



SIGNUS

SISTEMA COLECTIVO DE GESTIÓN DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO

G

uía sobre materiales circulares con neumático reciclado en edificación

"Prefabricados de escayola con caucho"



AUTORES

Alicia Zaragoza Benzal

Profesora de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
Escuela Técnica Superior de Edificación, Departamento de Tecnología de la Edificación

Daniel Ferrández Vega

Profesor de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
Escuela Técnica Superior de Edificación, Departamento de Tecnología de la Edificación

Roberto Pérez Aparicio

Responsable de Desarrollo e Innovación
SIGNUS Ecovalor

Leticia Saiz Rodríguez

Directora Técnica
SIGNUS Ecovalor

EXONERACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Las recomendaciones recogidas en este documento proceden de un estudio riguroso de la literatura existente y del propio conocimiento y experiencia de los autores, además de la síntesis de los resultados experimentales llevados a cabo en laboratorio según los procedimientos habituales del sector de la edificación.

Los autores de la presente Guía han elaborado la misma con el mejor criterio y rigor técnico posible. Sin embargo, será en última instancia el buen criterio del usuario de la misma el único que puede garantizar un resultado satisfactorio, por lo que los autores y SIGNUS Ecovalor se eximen de toda responsabilidad derivada de su aplicación práctica.

ISBN: 978-84-09-77058-8

©Copyright SIGNUS ECOVALOR

Depósito legal: M-22629-2025



SIGNUS

SISTEMA COLECTIVO DE GESTIÓN DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO



RESEÑA

SIGNUS Ecovalor es una entidad sin ánimo de lucro creada como sistema colectivo de responsabilidad ampliada del productor a disposición de todos aquellos fabricantes e importadores (productores) que deben cumplir sus obligaciones legales en relación con la gestión de los neumáticos al final de su vida útil.

La misión de SIGNUS es responder a la necesidad que tiene la sociedad de vivir en un entorno sostenible, garantizando el adecuado tratamiento de los neumáticos al final de su vida útil desde su generación hasta su transformación en materias primas con valor.

La utilización de caucho reciclado para la fabricación de nuevos productos dentro del sector de la edificación es una alternativa más de reciclaje de los neumáticos al final de su vida útil y que contribuye, además, a los principios de Economía Circular al reducir el consumo de materias primas vírgenes con la consiguiente mejora ambiental.

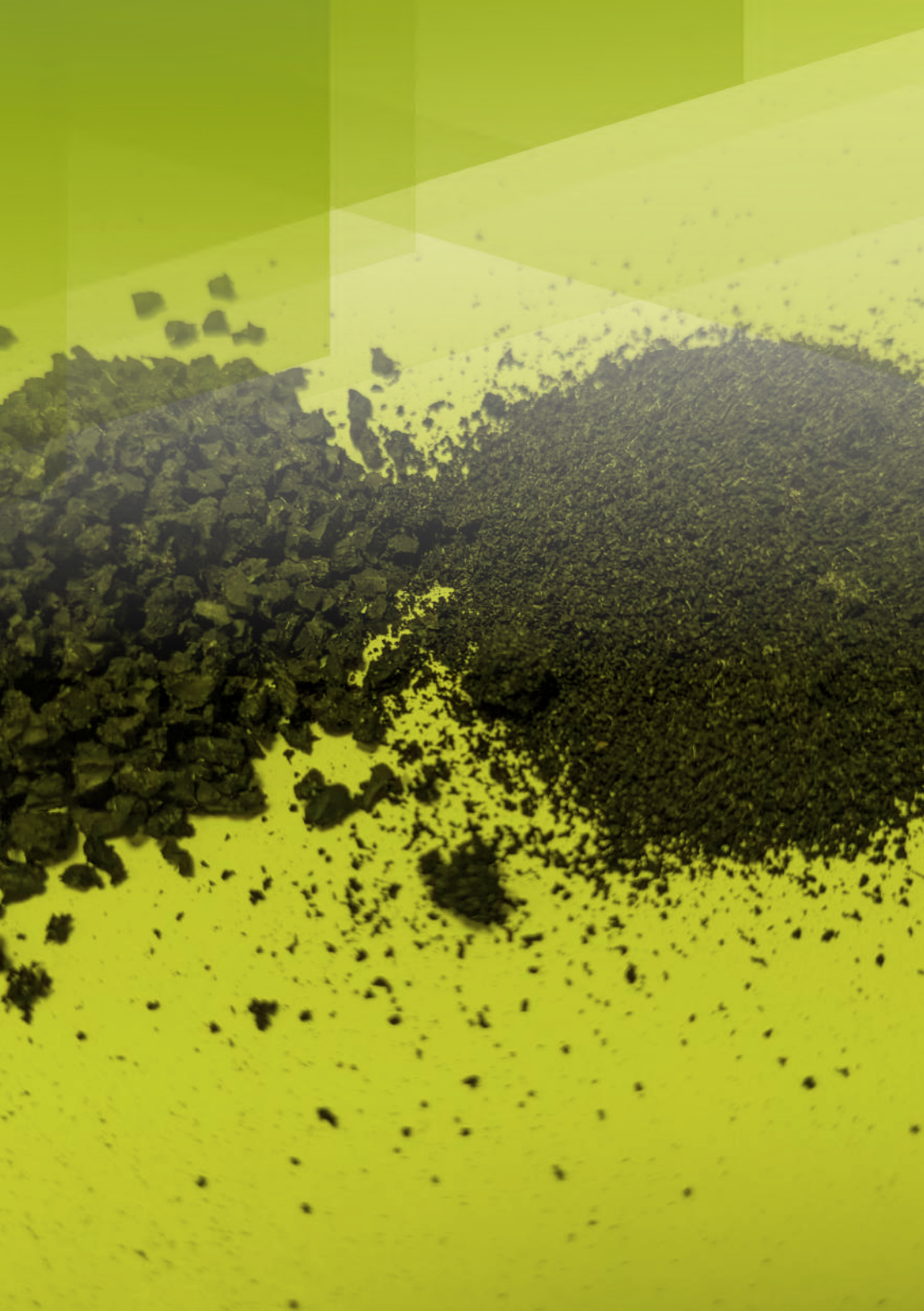


Agradecimientos

SIGNUS quiere destacar el compromiso y dedicación de los autores de este documento en la elaboración de esta publicación, así como a los miembros del Laboratorio de Materiales de Construcción de la E.T.S. de Edificación (UPM) que ayudaron en la realización de los ensayos mecánicos. De la misma forma, quiere agradecer al profesor Paulo Santos de la Universidad de Coímbra su apoyo en la realización de los ensayos de conductividad térmica.

Los profesores de la Universidad Politécnica de Madrid quieren agradecer el apoyo mostrado a través de la consolidación del *Aula SIGNUS-UPM* para impulsar labores de educación e investigación sobre estos nuevos materiales sostenibles. Así como, la financiación recibida en el marco del Convenio entre la Comunidad de Madrid y la Universidad Politécnica de Madrid para el fomento y promoción de la investigación y la transferencia de tecnología 2023-2026 (ref.: DOCTORES-EMERGENTES-24-NZMO4U-16-3U7Z8W).

Por último, SIGNUS quiere agradecer a la planta de reciclaje de Valoriza por el suministro de muestras de caucho procedente de la trituración y molienda del neumático al final de su vida útil para la consecución de los ensayos realizados en laboratorio.



Índice

0. PRESENTACIÓN DE LA GUÍA	9
1. INTRODUCCIÓN	13
2. DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS DE ESCAYOLA CON CAUCHO RECICLADO	17
2.1. Materiales	17
2.1.1. Caucho reciclado	18
2.1.2. Material conglomerante: Escayola	21
2.1.3. Agua de amasado	21
2.2. Preparación de los compuestos de escayola	21
2.3. Técnicas de caracterización	25
2.4. Técnicas de caracterización de productos reciclados	29
3. ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE COMPUESTOS CON CAUCHO RECICLADO	35
3.1. Propiedades mecánicas	35
3.2. Propiedades térmicas	39
3.3. Propiedades frente a la acción del agua	43
3.4. Propiedades frente a la acción del fuego	45
4. RECICLABILIDAD	49
4.1. Caracterización mecánica de la Serie 1: compuestos de referencia	50
4.2. Caracterización mecánica de la Serie 2: compuestos reciclados	52
4.3. Caracterización química y mecánica de la Serie 3: compuestos reciclados	54
4.3.1. Caracterización físicoquímica del material de escayola reciclado de la Serie 3	54
4.3.2. Caracterización química y mecánica de los compuestos reciclados de la Serie 3	56
5. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE COMPUESTOS CON CAUCHO RECICLADO	63
5.1. Unidad funcional y condiciones de contorno	63
5.2. Análisis del inventario	63
5.3. Impactos ambientales asociados	66
6. APLICACIONES	73
7. CONCLUSIONES	77
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
9. NORMAS DE REFERENCIA	89



Presentación de la guía



En los últimos años, ha surgido un gran interés en diversificar y aumentar el empleo de caucho reciclado procedente de los neumáticos al final de su vida útil (NFVU) en productos de gran potencial de consumo y alto valor añadido. Uno de los sectores que se han identificado donde se puede aplicar este material por sus propiedades de absorción acústica y térmica es el sector de la edificación.

En este sentido, en 2023, SIGNUS firmó un acuerdo de colaboración con la Escuela Técnica Superior de Edificación para la creación del Aula Universidad-Empresa SIGNUS, bajo la denominación "*Aula Signus*". El objetivo de este Aula es promover trabajos de investigación para incentivar la carrera investigadora de profesorado y estudiantes de la E.T.S. de Edificación para la búsqueda de aplicaciones de los materiales procedentes del reciclaje de NFVU en el sector de la edificación. Son de especial interés las siguientes líneas de trabajo:

- Búsqueda de nuevos nichos de mercado y posibilidades de aplicación de los materiales procedentes de NFVU en edificación mediante el desarrollo de sistemas constructivos y prefabricados.
- Recuperación de los filamentos metálicos de NFVU para su incorporación como refuerzo en materiales conglomerantes de construcción.
- Recuperación de la fibra textil de NFVU y búsqueda de aplicaciones en materiales de elevadas prestaciones térmicas.
- Aplicación del caucho reciclado en diferentes granulometrías como aditivo en materiales de construcción o como sustituto parcial/total de los áridos naturales.

En los trabajos realizados a nivel de laboratorio en compuestos de escayola, se ha demostrado que el caucho reciclado no solo puede sustituir una parte de escayola/ yeso mejorando propiedades como su comportamiento frente a la acción del agua, sino que también actúa como aislante térmico y acústico.

Con el deseo de compartir con el sector los resultados de esta investigación, nace esta Guía donde se recoge principalmente el siguiente contenido:





- descripción de los ensayos para caracterizar el polvo/granulado de caucho de NFVU
- descripción de los parámetros clave para el diseño de este tipo de compuestos de escayola con caucho reciclado
- resultados del análisis de las propiedades de algunas formulaciones de escayola con caucho
- reciclabilidad y análisis del ciclo de vida

La Guía está concebida para que sea una herramienta de trabajo de aplicación sencilla, destinada fundamentalmente a especialistas en el sector de la edificación que deseen incorporar caucho reciclado procedente del neumático^a a sus productos para soluciones constructivas.

“El empleo de caucho reciclado de NFVU en prefabricados de escayola puede mejorar su comportamiento frente a la acción del agua, mejorar el aislamiento térmico y acústico.”

^aA lo largo del documento se usan indistintamente denominaciones como caucho de NFVU, caucho reciclado, o polvo/granulado de caucho para hacer referencia a la fracción de caucho obtenida del proceso de transformación de los neumáticos al final de su vida útil (NFVU).



Introducción



Los modelos actuales de consumo y el crecimiento económico basado en la explotación de recursos naturales para fabricar nuevos productos contribuyen al deterioro medioambiental e impiden el desarrollo sostenible. Hoy en día, la gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD) supone un reto, no obstante, la UE ya lo contempla dentro del Pacto Verde Europeo desde 2020, donde una transición ecológica de los países de la Unión pasa por alcanzar un **uso eficiente de los recursos de la construcción**. Y es que, para la movilización de una industria sostenible en pro de una economía circular es necesario llevar a cabo un rediseño de los procesos de producción convencionales. Por este motivo, es necesario adoptar nuevos mecanismos y técnicas que permitan impulsar la sostenibilidad en la manufactura de los productos de construcción [1]. Con esta finalidad, la de impulsar un cambio de mentalidad en las empresas dedicadas a la producción y venta de prefabricados para la construcción, se propone el empleo de caucho reciclado procedente de neumáticos en el diseño de placas y paneles de escayola.

Es bien conocido que **el caucho reciclado procedente de neumáticos al final de su**

vida útil (NFVU) es un recurso material que presenta numerosas ventajas, no solo ambientales por ser un material procedente de un residuo, sino también técnicas por las propiedades que aporta a los productos, entre ellas: absorción de impactos, absorción de vibraciones y ruido o durabilidad, además de ahorro en el consumo de recursos naturales al sustituir materias primas vírgenes. Su elasticidad y durabilidad hacen del caucho reciclado un excelente material para su empleo en productos de aislamiento tanto térmico como acústico en diversos sectores como el de la edificación.

La aplicación industrial más ampliamente extendida para el empleo de compuestos de escayola es el desarrollo de placas y paneles prefabricados. Estas piezas para construcción modular son empleadas en la ejecución de falsos techos de viviendas, particiones interiores o trasdosados de fachada, entre otras muchas aplicaciones [2]. En las últimas décadas, se ha potenciado su empleo debido a la abundancia relativa de este mineral de yeso en la naturaleza, su proceso de producción, medioambientalmente más sostenible que el cemento y su versatilidad como material aislante, regulador higratérmico e incombustible [3]. En el contexto nacional, España ocupa una posición destacada como

productor mundial de yeso, ocupando una posición líder como productor europeo y principal exportador (excluyendo Turquía) [4]. Su producción continúa en aumento como se puede observar en la Figura 1.1, superando en el año 2021 los 14 millones de toneladas métricas (según los últimos datos disponibles)

[5]. No obstante, aunque los procesos de fabricación de este material se perfeccionan anualmente, al producir grandes volúmenes de estos productos se hace necesaria la búsqueda de soluciones que permitan reducir el impacto ambiental de estos prometedores materiales de construcción.

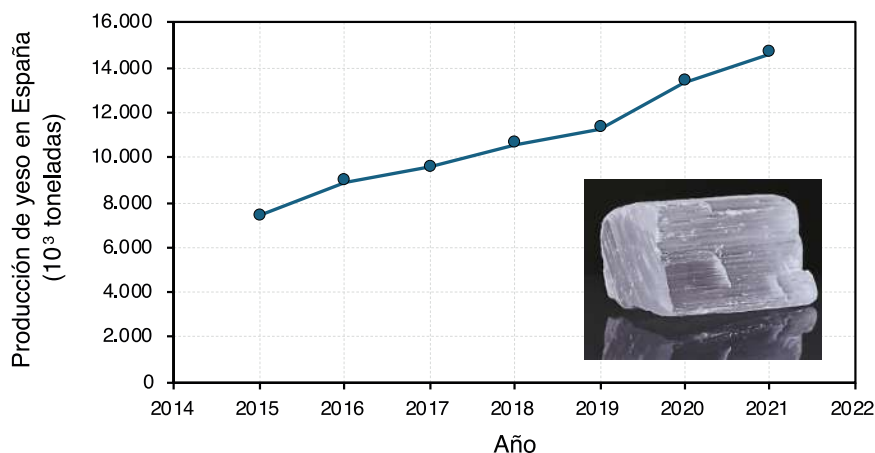
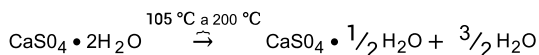


Figura 1.1. Producción de yeso en España (2015-2021). Fuente: elaboración propia a partir de Statista [5].

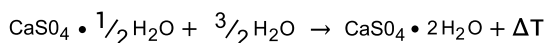
La elección de la escayola como conglomerante viene respaldada por su menor consumo de energía durante su proceso de fabricación, su obtención como materia prima secundaria

obtenida como componente en múltiples procesos industriales y la posibilidad que ofrece para ser reciclada al ser el proceso de obtención reversible de la siguiente forma [6]:

a) Deshidratación: por efecto de calentamiento, el yeso dihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) cambia de fase y pierde agua combinada transformándose en hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$) y anhidrita (CaSO_4)



b) Hidratación: cuando se le añade agua al hemihidrato tiene capacidad de endurecer (fraguar), quedando el yeso fraguado en su estado original (yeso dihidrato)



Asimismo, este material de construcción ampliamente extendido y utilizado desde la antigüedad, gracias a su versatilidad para conformar placas y paneles prefabricados, ha contribuido a impulsar la industrialización del sector de la construcción. Estos prefabricados presentan la ventaja de poder ser colocados in situ reduciendo los tiempos de ejecución, los residuos generados en obra y abaratando los costes de proyecto [7]. Por todo ello, no es de extrañar que su incorporación en fase de ejecución de viviendas y locales comerciales se haya visto incrementada progresivamente en las últimas décadas.

La incorporación de aditivos durante el proceso de fabricación con la intención de modificar las propiedades físicas y mecánicas de estos materiales de construcción es una práctica común dentro del sector. De esta manera, **el empleo de caucho reciclado de NFVU en diferentes granulometrías como reemplazo del material de yeso original puede suponer un avance hacia la disminución del consumo de recursos naturales en el sector de la edificación, así como una aplicación viable técnicamente para estas materias primas secundarias.** En términos generales, cuando se pretende mejorar la resistencia mecánica de los compuestos de yeso o escayola, o bien se emplean fibras de refuerzo, o se reduce la ratio agua/conglomerante (mediante el uso de agentes químicos plastificantes) incrementando su densidad [8]. El empleo de polvo y granulado de caucho procedente de NFVU aunque no produce una mejora significativa de la resistencia mecánica, contribuye a la mejora de otras propiedades igualmente relevantes para estos prefabricados no estructurales. En este sentido, la integración de caucho reciclado en una matriz de escayola puede resultar beneficiosa para mejorar su comportamiento frente a la acción del agua [9], así como reducir su conductividad térmica y acústica [10]. Estas mejoras pueden resultar ventajosas en la búsqueda de alternativas en

el diseño de prefabricados con base yeso en cuartos húmedos, así como para mejorar la eficiencia energética de las edificaciones actuales a través del desarrollo de nuevos sistemas de construcción aligerados con una mayor resistencia térmica.

En este trabajo, no solamente se emplea caucho reciclado procedente de NFVU como sustituto parcial de la materia prima original con base escayola, sino que también se evalúa el potencial de reciclabilidad de los materiales compuestos desarrollados. Es decir, en este trabajo también se **evalúa la reciclabilidad de prefabricados de escayola** explorando vías para su reciclaje: analizando tanto la posibilidad de triturar y tamizar el compuesto de escayola con caucho reciclado para su reincorporación en la fabricación de nuevos productos con base yeso, como la posibilidad de triturar, tamizar y separar el material de escayola del caucho para posteriormente desecarlo y obtener de nuevo el conglomerante de hemihidrato en polvo.

Por todo ello, en este documento se recogen los resultados del proyecto desarrollado **para el empleo de caucho reciclado procedente de neumáticos en el diseño de placas y paneles de escayola para el sector de la edificación**, en colaboración con el Departamento de Tecnología de la Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid a través del *Aula signus*. Tras una descripción de los materiales empleados, se presentan las recomendaciones para el diseño y preparación de compuestos de escayola con caucho reciclado de NFVU. A continuación, se presentan los resultados de una serie de ensayos de laboratorio con el objetivo de realizar un estudio detallado de las prestaciones de dichos compuestos y mostrar las bondades derivadas del empleo de caucho reciclado de NFVU. Finalmente, se lleva a cabo una evaluación de la reciclabilidad de los compuestos y del impacto ambiental derivado de su proceso de fabricación.



Diseño y caracterización de compuestos de escayola con caucho reciclado

2

En este capítulo se describe la metodología seguida para llevar a cabo el diseño y preparación de placas y paneles prefabricados de escayola con incorporación de caucho procedente de NFVU. El objetivo final es mostrar, a modo de ejemplo, diferentes alternativas para la aplicación de estas materias primas secundarias en el desarrollo de materiales de construcción novedosos y sostenibles.

Con este objetivo presente y teniendo en cuenta que los compuestos de escayola que contienen caucho reciclado procedente de NFVU deben cumplir con los mismos requerimientos y propiedades medidas bajo las mismas condiciones que los convencionales, en este capítulo se van a describir los materiales, los métodos de preparación y los ensayos experimentales de caracterización empleados en el sector de la edificación, con el fin de garantizar el cumplimiento de las especificaciones de los diferentes productos.

El proceso aquí descrito es orientativo y no limitativo, pudiéndose recoger otras formulaciones igualmente válidas para el rediseño de los tradicionales compuestos con base yeso y que permitan la valorización de estos materiales obtenidos del reciclaje del neumático. El criterio elegido para seleccionar las composiciones aquí concebidas no es otro que el de ofrecer formulaciones útiles, genéricas y fácilmente adaptables, que cumplan con los requisitos de la normativa actual y tengan validez suficiente para ser empleadas en el sector de la edificación.

2.1. Materiales

Los materiales empleados para la fabricación de los diferentes compuestos estudiados han sido:

- escayola comercial
- agua corriente
- caucho reciclado procedente de NFVU:
 - polvo < 0,8 mm
 - granulado 0,5 – 2,5 mm



Figura 2.1. Materias primas empleadas: (a) escayola, (b) fracción de caucho granulado, (c) fracción de caucho en polvo.

2.1.1 Caucho reciclado

Los neumáticos son productos de gran complejidad [11, 12] que deben alcanzar elevados requerimientos técnicos en términos de seguridad, eficiencia en el consumo de combustible y durabilidad, entre otros. Para poder lograr estas óptimas prestaciones, los neumáticos están constituidos por más de doscientas materias primas y varios compuestos de caucho diferentes, los cuales varían en función del uso y tipo del propio neumático [13], dificultando los procesos de reciclado y separación de dichos materiales una vez que el neumático ha alcanzado el final de su vida útil.

Para su transformación y reciclaje, los neumáticos se someten a sucesivos procesos de trituración y molienda mecánica que conllevan una reducción del tamaño de las partículas de caucho, además de la separación de la fibra textil (mediante sistemas de aspiración) y los filamentos metálicos de acero (mediante equipos de separación magnética). El resultado es la obtención de partículas de caucho de diferentes tamaños (< 10 mm) en forma de granulado ($0,8 - 10$ mm) o polvo de caucho ($< 0,8$ mm), fracción textil y fracción de acero.

La descripción, caracterización y control de calidad del polvo y granulado de caucho se hace principalmente en base a los ensayos

de análisis granulométrico, contenido de impurezas y humedad descritos en las siguientes normas desarrolladas por el comité técnico europeo de normalización TC 366 y adoptadas por el correspondiente comité técnico nacional CTN 53-SC9:

- UNE-EN 14243-1 "Materiales producidos a partir de neumáticos al final de su vida útil. Parte 1: Definiciones generales relativas a los métodos para la determinación de sus dimensiones e impurezas."
- UNE-EN 14243-2 "Materiales producidos a partir de neumáticos al final de su vida útil. Parte 2: Granulado y polvo. Métodos para la determinación de sus dimensiones e impurezas, incluyendo contenido de acero libre y textil libre."
- UNE 53936:2015 EX "Materiales de neumáticos fuera de uso. Granulado de caucho. Determinación del contenido de fibra textil mediante el índice visual."
- UNE-EN 16916 "Materiales obtenidos a partir de neumáticos al final de su vida útil. Determinación de los requisitos específicos para el muestreo y el contenido de humedad utilizando el método de secado en estufa."

Aunque estos sean los principales ensayos para caracterizar las especificaciones técnicas

del polvo/granulado de caucho procedente de NFVU, la búsqueda de nuevos mercados y aplicaciones de mayores requerimientos técnicos y valor añadido para el caucho necesita poder establecer y cuantificar otros parámetros de calidad como la composición, morfología, o estructura de red de entrecruzamientos de las partículas de polvo/granulado de caucho. Estos parámetros permitirían establecer una relación más directa con las prestaciones y propiedades de los productos finales donde se empleen, o incluso aspectos relacionados con la seguridad en el uso de estas materias primas secundarias. Para una caracterización más avanzada, se puede consultar el documento publicado por SIGNUS "Guía para el empleo de caucho reciclado procedente del neumático en la industria del caucho" [14].

A continuación, se describen los ensayos mencionados anteriormente.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

El ensayo descrito en la norma europea con transposición nacional UNE-EN 14243-2 consiste en introducir una muestra seca de unos 100 – 250 gramos durante 10 – 15 minutos en un equipo de tamizado que disponga de un movimiento de vibración aplicado en tres dimensiones, para clasificar el material por tamaños mediante distintos tamices (ver Figura 2.2 como ejemplo).

La curva granulométrica se obtendrá tras el pesaje del material retenido en cada uno de los tamices empleados, describiendo el límite superior (tamaño de tamiz a través del cual pasa el 90% del material) e inferior (tamaño de tamiz a través del cual pasa el 10% del material) de la distribución de tamaños de partícula.



Figura 2.2. Equipo de tamizado para el análisis granulométrico.

CONTENIDO DE IMPUREZAS

Los ensayos correspondientes para determinar el contenido de materiales ferromagnéticos, fibra textil y otras impurezas son los descritos en la norma europea con transposición nacional UNE-EN 14243-2.

- **Contenido de fibra textil libre:** Durante el tamizado descrito en la mencionada norma, además de la clasificación por tamaños (granulometría), las fibras textiles que pueda contener la muestra tienden a formar pequeñas aglomeraciones que, una vez finalizado el tamizado (Figura 2.3), se separan y se pesan para su cuantificación.



Figura 2.3. Equipo para análisis del contenido de fibra textil.

- **Contenido de material ferromagnético:** El método descrito en UNE-EN 14243-2 se basa en la extracción y cuantificación del acero libre por medio de un imán de la muestra del material extendido en una bandeja haciendo varias pasadas (Figura 2.4).



Figura 2.4. Análisis del contenido de material ferromagnético.

- **Otras impurezas:** El método de ensayo descrito en la norma UNE-EN 14243-2 está basado en una separación densimétrica de materiales (Figura 2.5) mediante una solución salina cuya densidad es aproximadamente de $1,25 \text{ g/cm}^3$. Esta densidad es superior a la del caucho (del orden de $1,15 - 1,2 \text{ g/cm}^3$) lo que provoca que los elementos extraños localizables en el granulado/polvo de caucho como tierra, vidrio o alguna partícula metálica no ferromagnética, decanten en el fondo del recipiente empleado.



Figura 2.5. Material de laboratorio para el análisis del contenido de otras impurezas.

ÍNDICE VISUAL DEL CONTENIDO DE FIBRA TEXTIL EN EL GRANULADO

El método de ensayo que se describe en la norma UNE 53936:2015 EX permite determinar un índice visual del contenido de fibra textil libre y adherida al caucho, basado en el recuento de las partículas textiles detectables a simple vista en una muestra extendida superficialmente en una bandeja sobre la que se dispone una plantilla cuadrículada (Figura 2.6). El índice visual es la relación existente entre el número de celdas en las que se detecta textil a simple vista respecto al número total de celdas de la cuadrícula. Esta norma excluye del campo de aplicación el polvo de tamaño nominal inferior a $0,8 \text{ mm}$.

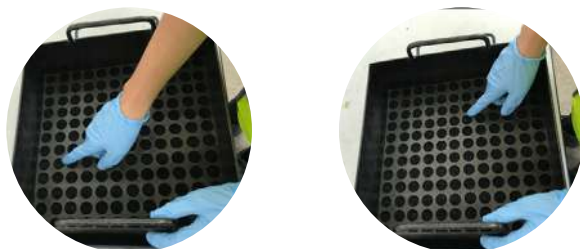


Figura 2.6. Análisis del índice visual del contenido de fibra textil en el granulado.

CONTENIDO DE HUMEDAD

El contenido de humedad del polvo/granulado de caucho se determina mediante el método específico para la determinación del contenido de humedad descrito en la norma europea EN 16916.

2.1.2. Material conglomerante: Escayola

La escayola se clasifica como un yeso tipo A de acuerdo con la norma UNE-EN 13279-1. Se trata de un material conglomerante para construcción con un amplio campo de aplicación en la elaboración de prefabricados [15]. Este material pulverulento de color blanquecino se caracteriza por su finura de molido y elevada pureza. Sus principales características se muestran en la Tabla 2.1.

Conductividad térmica (W/m·K)	0,30
Factor de difusión al vapor de agua	6
Reacción frente al fuego (Euroclase)	A1
Índice de pureza (%)	> 92
pH	6
Ratio en masa recomendado agua/escayola polvo	0,7 - 0,8
Tiempo de empleo (min)	15 - 18
Resistencia a flexión (MPa)	> 3

Tabla 2.1. Características de escayola comercial [17].

En cuanto a su composición química, Zaragoza-Benzal et al., señalan en su investigación que está constituida mayoritariamente por sulfato

de calcio (99,7%), aunque contiene trazas de Sr (0,157%), Si (0,068%), Fe (0,035%), Al (0,022%) y P (0,01%) [16].

2.1.3. Agua de amasado

Para el amasado de los compuestos de escayola se emplea comúnmente agua potable según la clasificación de la Directiva (UE) 2020/2184 del Parlamento Europeo. Para el caso concreto de los compuestos elaborados para esta guía se empleó agua corriente con una dureza media de 35,14 mg/L de CaCO_3 , un pH medio de 7,8 y un contenido en cloro total de aproximadamente 1,12 mg/L [18].

2.2.Preparación de los compuestos de escayola

Una de las potenciales aplicaciones de los compuestos de yeso es la conformación de placas y paneles prefabricados para su empleo en el interior de edificios. Así, para la ejecución de falsos techos se emplean generalmente placas de escayola de superficie cuadrada de en torno a 50×50 cm², que rara vez superan los 2 cm de espesor. No obstante, en ocasiones estas placas pueden presentar una dimensión mayor o geometría rectangular en función de los requerimientos del proyecto. Por su parte, los paneles prefabricados se emplean generalmente para la ejecución de particiones interiores, medianerías o trasdosados de fachada. Estas placas suelen tener una dimensión aproximada de 1,2×2,4 m², con un espesor aproximado de 2 cm. Sin embargo, a diferencia de las placas para falso techo, estos paneles se recubren con una lámina de papel en sus superficies para mejorar su resistencia a flexión. Asimismo, existen gran variedad de herrajes y tipos de ensamble para conformar la fijación y unión de estos productos de construcción.

En términos generales, el proceso de preparación de paneles prefabricados a nivel industrial está compuesto por las siguientes etapas [19]:

1. Procesado de las materias primas:

escayola, agua y aditivos entran en la mezcladora automatizada con un sistema de medición incorporado para regular la dosificación. Tras este proceso y tras obtener una pasta homogénea, el material se dispersa progresivamente y de manera uniforme sobre la superficie del papel de refuerzo de cuerpo móvil continuo.

2. Vertido: a través de un movimiento y vibración continuos, la pasta de yeso se dispersa de manera uniforme sobre la superficie del papel que se mueve ininterrumpidamente. Posteriormente, entra en la máquina formadora y se añade la capa de papel superficial superior.

3. Formación: a través de un proceso de extrusión y conformado, la pasta de yeso es sellada entre ambas láminas de papel. Estas placas, dispuestas sobre la línea de montaje automatizada se encuentran en estado húmedo en el momento de su formación, por lo que es necesario introducirlos en un sistema de secado.

4. Secado: realizado mediante sistemas de temperatura regulados y controlados, el cartón húmedo se seca con ayuda de una corriente de aire caliente gradual.

5. Corte y sellado: las placas se transportan por medio de una cinta mecanizada fuera

del secador, pasando por una guillotina que las corta al tamaño de producto deseado y se sellan los bordes de las mismas. Este acabado de los bordes puede variar en función de geometría o requerimiento del cliente.

6. Paletizado: es la última etapa, donde las placas se acumulan de forma apilada y se paletizan para posteriormente ser transportadas al almacén desde el que serán distribuidas.

Cabe destacar que la elaboración de placas para falso techo es similar, pero generalmente estas no llevan incorporada la lámina de papel de refuerzo. Además, otro punto relevante es el gran número de aditivos y agentes químicos que incorporan estos compuestos de yeso para conseguir una densidad reducida. Esta mayor ligereza es una gran ventaja competitiva en el mercado, ya que se reducen los costes y tiempos de ejecución en obra. Finalmente, cabe destacar que en ocasiones cuando la dimensión del prefabricado es muy grande o cuando el fabricante lo estima oportuno, estas placas y paneles pueden estar reforzadas con fibras sintéticas o naturales para mejorar su resistencia a flexión y evitar la rotura frágil [20].

En una primera parte de este trabajo, se ha llevado a cabo un estudio con prefabricados a escala de laboratorio. Así, se han conformado

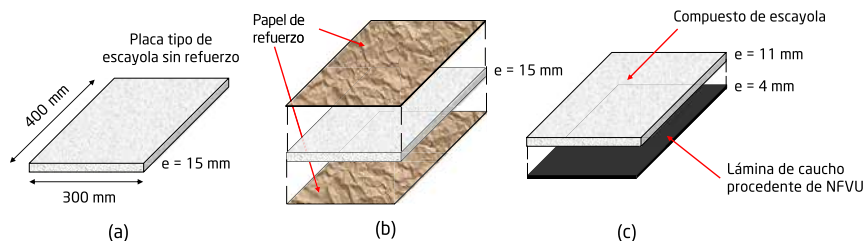


Figura 2.7. Diferentes configuraciones de placas diseñadas: (a) placa de escayola sin refuerzo, (b) placa de escayola reforzada con papel Kraft y (c) placa de escayola con lámina de caucho procedente de NFVU.

tres configuraciones diferentes de placas que se muestran en la Figura 2.7 y que presentan una dimensión de $40 \times 30 \times 1,5 \text{ cm}^3$.

Así, una primera configuración de placa está conformada por diferentes compuestos de escayola sin ningún refuerzo adicional (Figura 2.7a). Otra configuración (Figura 2.7b) estaría formada por esos mismos compuestos a los cuales se les adhiere una lámina de papel Kraft para mejorar su resistencia mecánica. Y, finalmente, se ha diseñado una tercera configuración (Figura 2.7c) en la cual el compuesto de escayola se vierte sobre una lámina de granulado de caucho de NFVU aglomerado con resina. Este último compuesto se ha diseñado con el objetivo de favorecer la rotura de puente térmico entre el prefabricado y la periferia metálica de sustentación de los paneles. Las características del papel Kraft y la banda de caucho empleados son:

- **Papel Kraft:** este papel ofrece una mayor resistencia al ser adherido a las placas de yeso sometidas a esfuerzos de flexión y presenta una densidad de 45 g/m^2 . Su

empleo está comúnmente aceptado en la edificación [21].

- **Lámina de caucho-corcho aglomerado (comercial):** lámina de 4 mm fabricada con granulado de caucho reciclado procedente de NFVU y corcho triturado aglomerado con resina de PU (poliuretano) [22]. Se caracteriza por su reducida densidad $650 - 750 \text{ kg/m}^3$, resistencia a tracción mayor de 350 kPa y conductividad térmica de $0,14 \text{ W/m.K}$.

Para la preparación de los diferentes compuestos de escayola elaborados en este trabajo se han seguido las recomendaciones de la norma UNE-EN 13279-2. Este proceso comprende diferentes etapas que se recogen en la Figura 2.8.

En cualquier caso, el proceso descrito en la Figura 2.8 es genérico y susceptible de ser modificado. Así, en algunos casos puede ser interesante incorporar fibras de refuerzo (naturales o sintéticas) para mejorar la resistencia mecánica y ductilidad de los prefabricados de escayola [23]. En estos casos, el material de refuerzo se



Figura 2.8. Proceso de preparación de los compuestos de escayola.

adiciona generalmente en seco y se mezcla junto con el conglomerante antes de iniciar el proceso de amasado. Por otro lado, con el objetivo de aumentar la trabajabilidad de la mezcla y/o variar los tiempos de fraguado de estos compuestos con base yeso, también se puede recurrir al empleo de aditivos superplastificantes que generalmente se añaden al agua de amasado [24].

El tiempo de fraguado se determina generalmente con ayuda de la aguja de Vicat. Este dispositivo mecánico mostrado en la Figura 2.9 permite determinar el tiempo de inicio de fraguado de los compuestos de escayola como (ecuación 2.2.1):

$$t_{inicio} = t_1 - t_0 \quad (2.2.1)$$

donde t_1 es el tiempo, en minutos, en que la profundidad de penetración de la aguja dentro de la pasta de escayola llega a los 22 ± 2 mm, y t_0 es el tiempo, también en

minutos, en que el conjunto escayola y caucho de NFVU entra en contacto con el agua.

Por su parte, en la Tabla 2.2 se muestran las proporciones en masa empleadas para el amasado de los compuestos de escayola desarrollados para este documento. Las masas incluidas en dicha tabla se han determinado en base a la cantidad necesaria para conformar tres probetas de ensayo prismáticas de $4 \times 4 \times 16$ cm³. Así, el porcentaje de reemplazo de la materia prima original por caucho reciclado de NFVU se establece en función del volumen equivalente que ocupa la pasta de escayola elaborada (% en volumen).

Se han utilizado dos porcentajes de reemplazo de caucho reciclado por escayola, 20% y 40% en volumen, tanto del granulado ("G") como del polvo ("P") de caucho, así como de una mezcla de ambos ("M"). La mezcla de granulado y polvo de caucho ("M") se ha realizado mezclando ambos en las

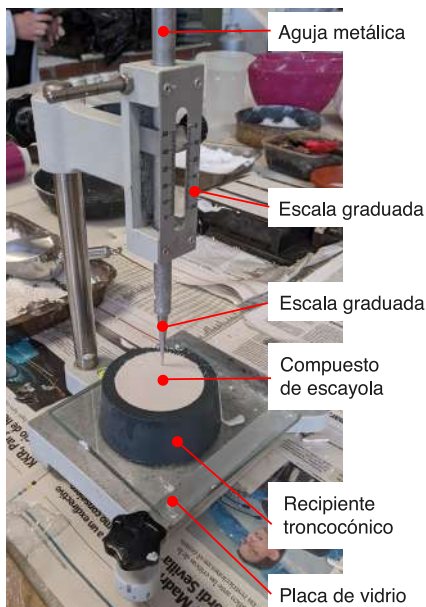
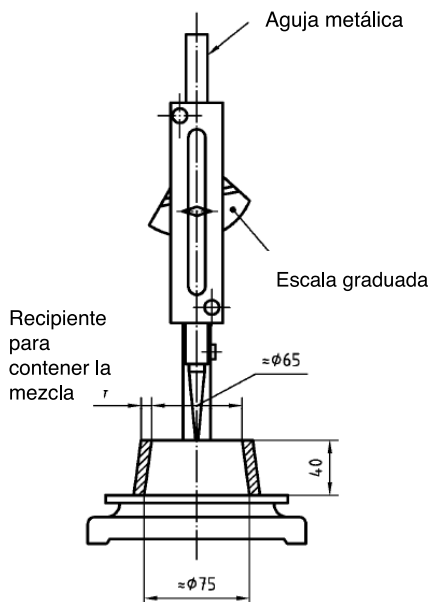


Figura 2.9. Aguja de Vicat para determinar el tiempo de inicio de fraguado: esquema de la norma UNE-EN 13279-2 (izqda.) y ensayo real de laboratorio (dcha.).

Compuesto	Escayola (g)	Agua (g)	Granulado caucho (0,5 - 2,5 mm) (g)	Polvo caucho (< 0,8 mm) (g)	% caucho en vol.	Tiempo fraguado (min)	Ahorro materia prima (%)
E0.7	1000	700	-	-	-	15	-
E0.7-20%G	800	560	75	-	20	12	20
E0.7-40%G	600	420	150	-	40	10	40
E0.7-20%P	800	560	-	60	20	13	20
E0.7-40%P	600	420	-	120	40	10	40
E0.7-20%M	800	560	37,5	30	20	13	20
E0.7-40%M	600	420	75	60	40	11	40

Tabla 2.2. Dosificaciones en masa empleadas para la elaboración de los diferentes compuestos de escayola.

mismas proporciones en volumen. A continuación, se ha preparado la mezcla en seco de la escayola junto con el caucho, lista para ser empleada en el proceso de amasado de los compuestos.

Una vez finalizado el proceso de fraguado de las muestras, se procede al desmolde de los compuestos de escayola elaborados. Así, estas muestras endurecidas se mantienen a temperatura y humedad ambiente durante seis días (22 ± 2 °C y 55 ± 5 %), y posteriormente, durante un periodo de 24 horas se desecan en estufa (40 ± 2 °C) hasta alcanzar una masa constante. Una vez realizado este proceso, las muestras elaboradas ya se encuentran en condiciones óptimas para ser ensayadas y determinar sus propiedades físico-mecánicas.

Finalmente, conviene destacar que las condiciones de temperatura y humedad ambientales pueden afectar al correcto fraguado y endurecimiento de estos compuestos de escayola. Así, temperaturas excesivamente bajas (próximas a 0 °C) podrían ralentizar la reacción exotérmica que se genera durante el proceso de endurecimiento de los

compuestos de escayola, generando compuestos más frágiles y el acortamiento de los cristales de dihidrato de la estructura de la escayola. De la misma forma, una humedad relativa ambiente muy elevada (mayor del 80 %) podría dificultar la exudación del agua libre de amasado o incluso aumentar la ratio en masa agua/conglomerante, disminuyendo la resistencia final de los compuestos y limitando su potencial de aplicación en la edificación [25].

2.3. Técnicas de caracterización

En este apartado se presenta la metodología llevada a cabo en la realización de los ensayos de caracterización incluidos en esta guía, así como la normativa de referencia empleada con el objetivo de potenciar la replicabilidad de estos experimentos.

Desde un punto de vista mecánico, es conveniente conocer la **resistencia a flexión de estos prefabricados** y su **resistencia frente al impacto**. Se han llevado a cabo los siguientes ensayos para caracterizar los compuestos de escayola diseñados:

- **Resistencia a flexión en placas:**

ensayo determinado según las indicaciones de la norma UNE-EN 12859. Consiste en determinar la máxima carga a rotura que son capaces de soportar las placas de yeso sometidas a un ensayo de flexión pura en tres puntos. Las placas de dimensión $40 \times 30 \times 1,5$ cm³ se colocan separadas una distancia de 35 ± 1 cm sobre los rodillos de la prensa modelo MPX-22 de PÁCAM y posteriormente, se aplica una carga puntual en el centro del vano hasta la rotura de la pieza (Figura 2.10a). Se ensayan un total de tres réplicas para cada tipología de compuestos de escayola.



(a)

- **Dureza frente al impacto:**

se determina midiendo el diámetro que produce una bola de acero de 50 mm de diámetro al impactar sobre la superficie de la placa ensayada (se emplearon placas de dimensiones $40 \times 30 \times 1,5$ cm³). La bola se deja caer desde una altura de 50 cm, impactando sobre la superficie del compuesto que se sitúa en la parte inferior (Figura 2.10b). Se toman un total de cinco medidas para cada compuesto, obtenidas como la media de los dos diámetros transversales de la huella obtenida tras el impacto. Habitualmente, se ensayan un mínimo de tres muestras para cada compuesto incluido en el estudio.



(b)

Figura 2.10. (a) Ensayo de resistencia a flexión en placas de escayola y (b) dureza frente al impacto.

Por otro lado, es conveniente analizar el **comportamiento térmico y frente a la acción del agua de estos compuestos**. Los materiales con base yeso presentan una buena capacidad de regulación higrotérmica, por lo que se convierten en un material idóneo para su aplicación en el interior de viviendas y locales comerciales. No obstante, su utilización como material de construcción en ocasiones se ve limitada principalmente por su elevada solubilidad y pérdida de resistencia en ambientes húmedos [26]. Por este motivo, no es de extrañar que se busquen formas alternativas para mejorar la resistencia al agua del yeso. Esto puede realizarse mediante dos formas: la impregnación de la superficie o mediante la modificación del aglutinante de yeso con adiciones adecuadas [27]. Este tipo de acciones permiten a los

productos de escayola obtener una mayor durabilidad y ampliar su campo de aplicación. Las siguientes propiedades han sido determinadas para tal efecto:

- **Absorción de agua por capilaridad:**

esta propiedad determina la capacidad que presentan las diferentes muestras de absorber agua por unidad de superficie. Para ello, se emplean las recomendaciones de la norma UNE-EN 1925:1999 y se utilizan probetas de $4 \times 4 \times 16$ cm³. El coeficiente de absorción de agua por capilaridad se determina según la ecuación (2.3.1):

$$Coef_{cap} = \frac{w_t - w_0}{A_s \cdot \sqrt{t}} \quad (2.3.1)$$

donde w_t es la masa de la probeta en el instante t , w_o es la masa de la muestra en su estado inicial (peso seco), A_s es el área en m^2 de la muestra ($0,04 \times 0,04 m^2$), y , t es el tiempo en segundos. Para la realización de este ensayo, las probetas se disponen en posición vertical en el interior de un recipiente, separadas del fondo mediante una rejilla para evitar el contacto directo con el fondo. Posteriormente, se vierte agua en el interior hasta que las probetas quedan sumergidas a una profundidad de $10 \pm 1 mm$ (Figura 2.11a). Así, las muestras se pesan en intervalos de tiempo de 1, 3, 5, 10, 15, 20 y 40 minutos, anotando también la altura máxima alcanzada por el agua por capilaridad tras la realización del ensayo.

- **Absorción total de agua:** para determinar esta propiedad se siguen las recomendaciones de la norma UNE-EN 520. Para ello, se emplean muestras de dimensión $150 \times 150 \times 25 mm^3$ para cada una de las dosificaciones planteadas en este trabajo. De esta manera, se determina su peso seco antes de iniciar el ensayo y posteriormente, se sumergen completamente en agua durante un periodo de $120 \pm 2 min$, hasta que la muestra se sature de agua. A continuación, la muestra se pesa de nuevo obteniendo el peso saturado de la probeta. La

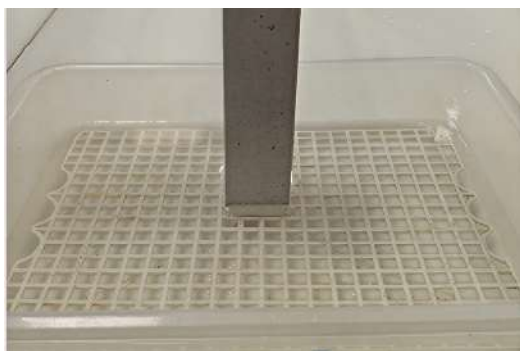
diferencia porcentual entre ambas pesadas determina la absorción total de agua del compuesto.

- **Porosidad abierta:** definida como la relación entre el volumen de poros del compuesto y el volumen aparente del material, se determina según la norma UNE-EN 1936 empleando la siguiente expresión (2.3.2):

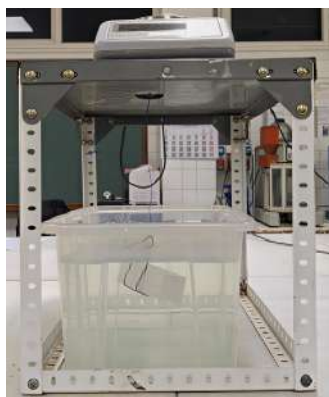
$$Por_{abieta} = \left(\frac{w_{sat} - w_o}{w_{sat} - w_{sum}} \right) \cdot 100\% \quad (2.3.2)$$

donde w_{sat} es el peso saturado de la muestra determinado según la norma UNE-EN 14617-1, w_o es el peso de la muestra desecada y w_{sum} es peso de la muestra saturada y sumergida en agua, pesada con ayuda de una balanza hidrostática (Figura 2.11b). Se emplearon placas de dimensiones $4 \times 4 \times 16 cm^3$.

Por otro lado, cerca del 40% del total de energía generada en la UE se consume en la refrigeración y calefacción de edificios [28]. Por este motivo, no es de extrañar que cada vez más se impulse el **desarrollo de materiales que presenten un comportamiento térmico mejorado**. Así, el Código Técnico de la



(a)



(b)

Figura 2.11. (a) Ensayo de absorción de agua por capilaridad y (b) determinación de la porosidad abierta.

Edificación (CTE) en su documento básico de ahorro de energía (DB-HE) tiene por objeto establecer reglas y procedimientos que permiten cumplir las exigencias básicas de ahorro energético. En él se recogen las pautas para determinar la resistencia térmica de los cerramientos y particiones de edificio, con el objetivo de verificar que cumplen con los requisitos térmicos impulsados por la UE. A tal efecto, es necesario conocer la **densidad y conductividad térmica** de los compuestos de yeso elaborados en este trabajo, así como llevar a cabo su análisis para **simular su desempeño** una vez puestos en obra. Para ello, se han llevado a cabo ensayos para medir las siguientes propiedades:

- **Densidad aparente:** esta propiedad física se determina conforme a las indicaciones de la norma UNE 102042 empleando para ello una serie de tres probetas de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ para cada muestra. Definida como la relación entre la masa del compuesto y su volumen, la masa se determina con ayuda de una balanza electrónica de precisión 0,01 g y el volumen

exacto se mide empleando para ello un calibre de precisión 0,01 mm.

- **Conductividad térmica:** determinada mediante el *guarded hot plate method*, tal y como se recoge en la norma UNE-EN 12664. Para ello, se emplean probetas de $15 \times 15 \times 2,5 \text{ cm}^3$ ensayadas con un equipo λ -Meter EP500e (Figura 2.12) y se toman medidas a 10, 25 y 40 °C para la conductividad térmica de cada compuesto. El ensayo se realiza durante 90 minutos a cada temperatura, tras haber alcanzado el régimen estacionario. Los resultados finales mostrados para la conductividad térmica se corresponden con el valor de la conductividad térmica a la temperatura de 25 °C dentro de la recta de regresión obtenida con las tres medidas tomadas experimentalmente.
- **Simulación numérica:** empleada para evaluar la repercusión derivada de la utilización de los productos de escayola elaborados con caucho reciclado en la ejecución de cerramientos y particiones. Así, se lleva a cabo

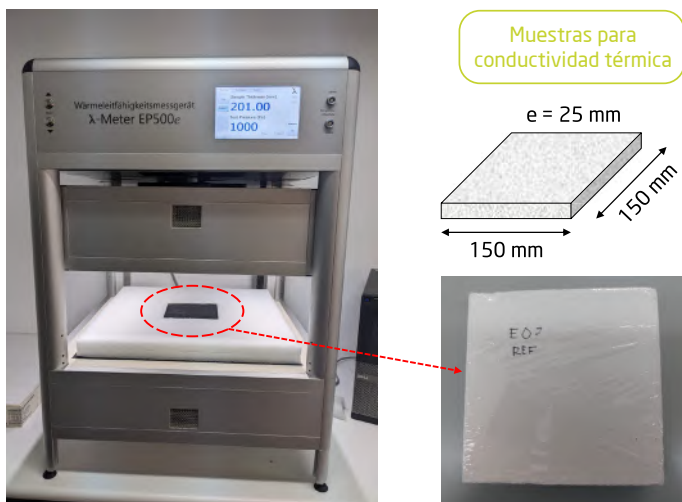


Figura 2.12. Determinación de la conductividad térmica de los compuestos estudiados.

un estudio sobre la resistencia térmica de un cerramiento de fachada y de una partición de vivienda, empleando un compuesto de escayola de referencia y otro con un 40 % de reemplazo en volumen de caucho reciclado. Para llevar a cabo este estudio se emplea el software libre *THERM*, comúnmente utilizado dentro de la comunidad científica [29].

Finalmente, para mostrar la potencial aplicación de estos productos de escayola y su viabilidad para ser aplicados en el sector de la construcción, se ha llevado a cabo el estudio de su **reacción frente al fuego**. El yeso dihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es considerado un material incombustible que ha sido empleado desde la antigüedad como elemento de protección en estructuras y sistemas constructivos [30]. Al verse sometido a altas temperaturas, como puede ocurrir en caso de un incendio, se evapora parte del agua de hidratación formando hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) y, finalmente, anhidrita (CaSO_4) [31]. Una ventaja destacable de este material es que no emite gases ni humos nocivos al incendiarse, sin embargo, su comportamiento cuando se incorpora caucho reciclado puede verse modificado y es necesario analizarlo [32]. Por este motivo, se ha realizado un estudio comparativo entre la escayola de referencia sin adiciones (E0.7) y dos compuestos con diferentes porcentajes de caucho (E0.7-20%P y E0.7-40%P).

- **Ensayos de reacción al fuego:** ensayos por el método del cono calorimétrico, realizados en el Laboratorio del Fuego de AIDIMME Instituto Tecnológico, según la norma ISO 5660-1:2015 *Ensayos de reacción al fuego. Desprendimiento de calor, producción de humos y pérdida de masa. Parte 1: velocidad de generación de calor (método del cono calorimétrico)*. Para ello, se emplean probetas de superficie $10 \times 10 \text{ cm}^2$ (Figura 2.13) y un cono calorimétrico. Así, tras la obtención de los resultados derivados de este ensayo, es posible hacer una predicción (no equivalencia directa) de la potencial clasificación en el sistema Euroclases (EN 13501-1), según un método desarrollado por AIDIMME. Hay que resaltar que es una predicción con una tasa de acierto/error implícita y que en ningún

caso supone una equivalencia directa, máxime cuando en el ensayo del cono calorimétrico no se puede evaluar el comportamiento del sistema constructivo, factor que sí se evalúa en el ensayo de gran escala del SBI (UNE-EN 13823:2021+A1:2023). No obstante, dicha predicción, en muchos casos, aporta valiosa información que evitar realizar el ensayo más complejo del SBI en el que además se precisan una cantidad de probetas 94 veces superior.



Figura 2.13. Probeta para ensayos de reacción al fuego.

2.4. Técnicas de caracterización de productos reciclados

En este trabajo, también se evalúa el proceso de reciclaje de prefabricados de yeso que contienen caucho reciclado de NFVU. Para ello, se prepararon tres series de probetas tipo RILEM ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) que se describen a continuación (Figura 2.14):

Serie 1: dosificaciones de referencia presentadas en la Tabla 2.2, empleando para ello escayola comercial y caucho reciclado de NFVU. Esta serie se toma como referencia para evaluar la reciclabilidad.

Serie 2: empleo de caucho obtenido de la trituración de las placas elaboradas en la Serie 1. Se trituran las probetas, se lleva a cabo un tamizado mecánico para obtener de nuevo la fracción de caucho del tamaño original (granulado 2–4 mm, polvo < 0,8 mm o la mezcla de ambos) y se mezcla con escayola virgen para fabricar nuevos compuestos con dosificaciones de caucho del 20 % y 40 % en volumen. Las partículas de caucho recuperadas contienen restos de la escayola empleada.

Serie 3: empleo de escayola reciclada obtenida de la trituración de las probetas de la

Serie 1. La escayola reciclada se obtiene tras el siguiente proceso [33]: trituración, tamizado, separación del caucho, molienda en molino de bolas y desecado durante 24 horas a 180 °C. La escayola reciclada se mezcla con caucho de NFVU no utilizado previamente para fabricar compuestos con dosificaciones del 20 % y 40 % en volumen.

En el caso del estudio de la reciclabilidad de estos prefabricados, que se tratará exclusivamente en un capítulo más adelante, se llevan a cabo los ensayos que se indican a continuación.

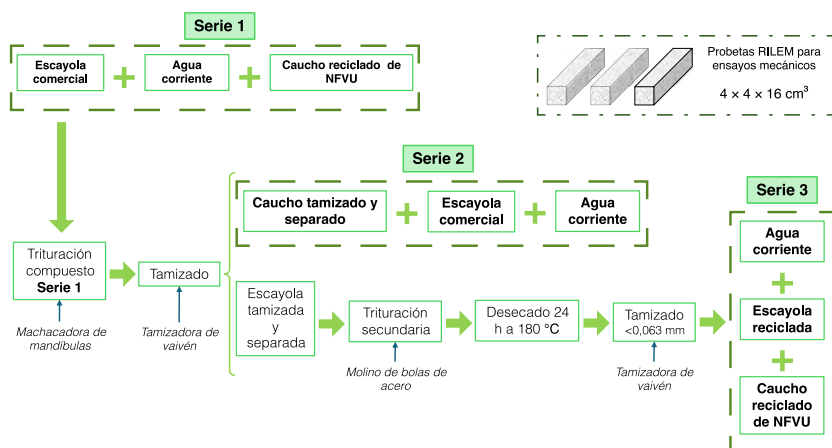


Figura 2.14. Esquema del estudio de reciclabilidad de los compuestos estudiados.

Una vez llevado a cabo el proceso de reciclabilidad, en primer lugar, se realiza una **caracterización fisicoquímica** de los compuestos obtenidos, así como del polvo de escayola natural y reciclada. Para ello, se realiza un estudio mediante difracción de rayos X (DRX) y un análisis termogravimétrico (TGA):

- **Difracción de rayos X (DRX):** se realizó con ayuda de un equipo *Siemens Kristalloflex D5000* con un monocromador de grafito Cu-K α . Los ángulos de difracción analizados estuvieron comprendidos entre 5° ≤ 2θ ≤ 60° medidos cada 0,04° y un tiempo de cuatro segundos por paso. Una vez obtenidos los

difractogramas, se determina el tamaño medio de los dominios cristalinos ordenados en la muestra con ayuda de la ecuación:

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2.4.1)$$

donde **D** es el tamaño medio del cristal (nm), **k** es la constante de Scherrer fijada en 0,94, λ es la longitud de onda de la radiación Cu-K α (1,54056 Å), β es la anchura completa a medio máximo (FWHM) del pico de rayos X en radianes y θ es el ángulo de Bragg también en radianes [34]. El FWHM se ha calculado utilizando el pico más intenso del sulfato de calcio dihidratado a 2θ=20,742°.

- **Análisis termogravimétrico (TGA):** se ha utilizado un equipo *TA Instruments SDT Q600*, empleando una velocidad de calentamiento de 10 °C/min avanzando desde la temperatura ambiente hasta alcanzar los 1000 °C, en una atmósfera de aire prefiltrado con un caudal de 100 mL/min.

Posteriormente, se lleva a cabo una **caracterización mecánica** para conocer las propiedades más relevantes de los compuestos elaborados. Para cada una de las series descritas anteriormente, se han llevado a cabo los siguientes ensayos normalizados:

- **Dureza superficial:** determinada según las recomendaciones de la norma UNE 102042. Para ello, se emplea un durómetro tipo Shore C y tres probetas de 4×4×16 cm³ para cada dosificación elaborada (Figura 2.15a). Así, empleando dos caras plano-parallelas que hayan estado previamente en contacto con el molde, se toman cinco medidas por cara. La toma de medidas se realiza de tal forma que la separación entre las mismas no sea inferior a 2 cm y al menos a 2 cm de distancia de los bordes de la probeta.
- **Módulo de elasticidad dinámico:** determinado con ayuda de un equipo de emisión-recepción de ultrasonidos *C368* de *Matest*, provisto de palpadores de contacto receptor-transmisor de 55 kHz (Figura 2.15b). Las lecturas de tiempo de paso se han realizado en sentido longitudinal de la probeta. Para determinar esta propiedad se emplea la ecuación (2.4.2):

$$MOE_{us} = \frac{\rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu) \cdot v_{us}^2}{1 - \mu} \quad (2.4.2)$$

donde ρ es la densidad aparente de los compuestos, μ es el coeficiente de Poisson que oscila entre 0,2 y 0,3, y v_{us} es la velocidad del ultrasonido a través de la probeta. Esta última se determina como el cociente entre la longitud de la probeta (16 cm) y el tiempo medido con ayuda del equipo de emisión-recepción empleado.



(a)



(b)

Figura 2.15. (a) Determinación de la dureza superficial con durómetro y (b) del módulo de elasticidad dinámico con equipo de ultrasonidos.

- **Resistencia a flexión:** determinada según la norma UNE-EN 13279-2 y empleando para ello una prensa hidráulica de modelo *AUTOTEST 200-10SW* de *IBERTEST*. Para ello, se emplean tres probetas de 4×4×16 cm³ para cada dosificación y serie analizada. Se trata de un ensayo de resistencia a flexión en tres puntos donde la carga se aplica en el centro de la muestra con una velocidad de 10 N/s hasta la rotura de la probeta.
- **Resistencia a compresión:** este ensayo también se recoge en la norma UNE-EN 13279-2 y se emplea el mismo equipo utilizado para determinar la resistencia a flexión. Esta prueba se realiza con las medias probetas generadas previamente tras el ensayo a flexión. De tal forma que se ensayan seis muestras para cada dosificación y serie recogida en este estudio. La carga se aplica



Figura 2.16. Prensa de ensayos mecánicos para determinar la resistencia a flexión y a compresión.

de forma progresiva sobre una superficie de $4 \times 4 \text{ cm}^2$ y empleando una velocidad de 20 N/s hasta la rotura de la probeta.

Además, con el objetivo de comprender más en profundidad el efecto de este proceso de reciclaje sobre los diferentes compuestos analizados se ha llevado a cabo un estudio mediante **microscopía electrónica de barrido (SEM)**. Como se verá más adelante, este

estudio se ha realizado sobre una muestra tipo E0.7-40%P de cada una de las tres series presentadas. La muestra para el análisis SEM ha sido obtenida del interior de cada probeta, buscando una cara sin alteraciones superficiales y que conserve la morfología original del compuesto.

- **Microscopía electrónica de barrido (SEM):** se emplea un equipo con detector de energía dispersiva (SEM-EDX) **TESCAN VEGA**

Generation 4, que permite obtener imágenes microscópicas de todo tipo de materiales (Figura 2.14). Las imágenes se pueden obtener con electrones secundarios y retrodispersados, estas últimas dan información de variaciones composicionales de la muestra, mientras que las primeras permiten observar la textura y características morfológicas de las fases analizadas. El software que utiliza

el equipo para la adquisición, tratamiento y evaluación de los análisis es el *EDX Oxford ISIS-Link*. Adicionalmente, se ha empleado una metalizadora *Cressington 108* con el fin de asegurar una buena conductividad ante el haz de electrones generado por el equipo, para lo cual se recubren las muestras con una fina película de oro.



Figura 2.17. Equipo de microscopía electrónica de barrido empleado.



ibertest

patrimoine

Estudio de las propiedades de compuestos con caucho reciclado



Una vez descrita la metodología para el diseño, preparación y caracterización de los compuestos desarrollados en este estudio, a continuación, se presentan los resultados de su caracterización. El análisis se centra en las propiedades mecánicas, el comportamiento térmico y las propiedades frente a la acción del agua y del fuego.

3.1. Propiedades mecánicas

Una parte importante dentro de la caracterización de los prefabricados de construcción consiste en verificar el

cumplimiento de la **resistencia mecánica a flexión** mínima exigida. Para el caso concreto de las placas y paneles prefabricados de yeso o escayola, la normativa actual UNE-EN 12859 establece que deben soportar una carga mínima a rotura de 0,18 kN. Los resultados de este ensayo para las diferentes tipologías de placas elaboradas en este estudio y descritas en la metodología se presentan en la Figura 3.1. Asimismo, en la Figura 3.2 se muestra una imagen del estado final de una placa de cada tipología tras ser sometida al ensayo de rotura a flexión.

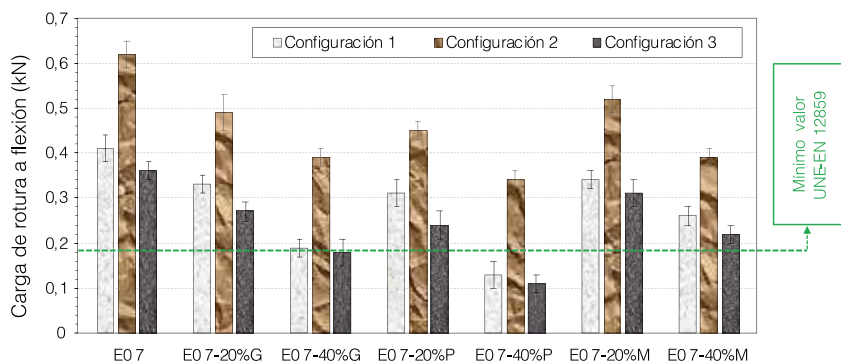


Figura 3.1. Carga máxima de rotura a flexión en cada configuración de placa elaborada: Configuración 1 sin refuerzo, Configuración 2 con refuerzo de papel Kraft y Configuración 3 con lámina elástica de caucho-corcho.

En los resultados obtenidos en la Figura 3.1, se puede observar una tendencia similar en todas las dosificaciones analizadas, esto es: una mejora de la resistencia a flexión al incorporar el refuerzo de papel Kraft (configuración 2) y una reducción de la carga máxima a rotura al incorporar la lámina de caucho-corcho (configuración 3) (hay que tener en cuenta que el espesor de la parte de escayola es 4 mm inferior a la configuración 1 al tener la lámina de caucho-corcho aglomerado). Por tanto, en una posible aplicación comercial de estos paneles prefabricados sería interesante añadir este refuerzo de papel Kraft para obtener unas resistencias mecánicas superiores. En términos generales, estos refuerzos de papel suponen en torno al 32 % del total del prefabricado de escayola elaborado [35], otorgándoles una resistencia muy superior que de otra forma solo se puede obtener aumentando la densidad de la matriz e incluyendo fibras de refuerzo

que encarecen notablemente el producto final [36]. Para el caso concreto de los compuestos analizados en este trabajo, el refuerzo con papel supuso en todos los casos un aumento de la carga máxima a rotura de al menos el 30% con respecto al material sin reforzar, lo que se encuentra en línea con lo obtenido en otras investigaciones [37]. Por su parte, las placas que incorporan la lámina de caucho-corcho presentaron una menor resistencia mecánica respecto a la referencia, aunque superaron en todos los casos los valores mínimos establecidos en la normativa a excepción de la muestra E0.7-40%P. Resultados similares han sido obtenidos al incorporar únicamente bandas de caucho prensado [21], destacando que el principal beneficio de estos composites es su aplicación como rotura de puente térmico en sistemas de construcción aligerados.

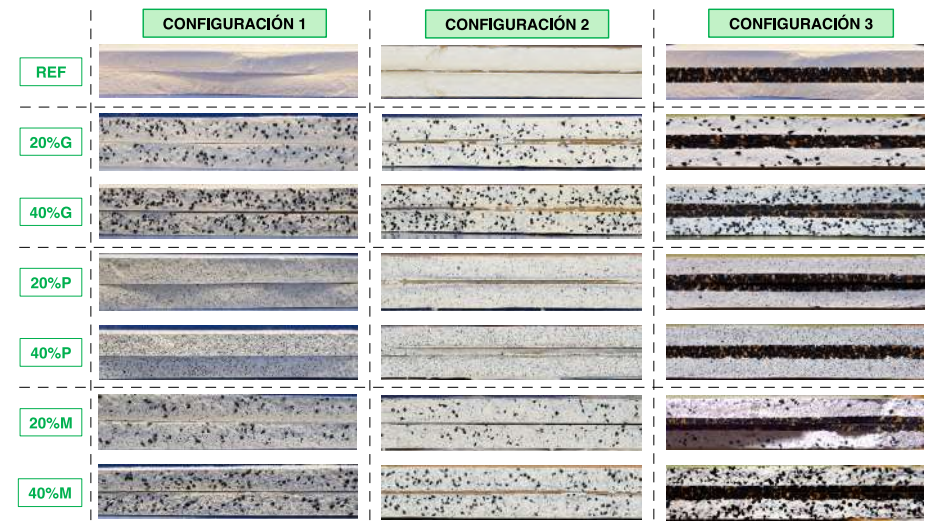
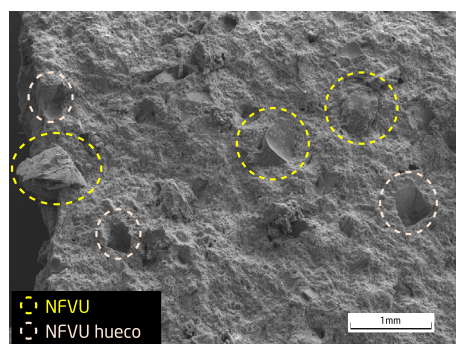


Figura 3.2. Imagen de las placas de escayola ($40 \times 30 \times 1,5 \text{ cm}^3$) tras el ensayo de carga de rotura a flexión: Configuración 1 sin refuerzo, Configuración 2 con refuerzo de papel Kraft y Configuración 3 con lámina elástica de caucho-corcho.

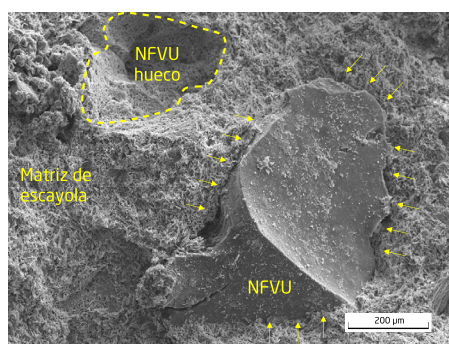
Por su parte, en lo referente a los diferentes compuestos elaborados, en todos los casos se observa una disminución de la resistencia mecánica con respecto al material base sin adiciones, siendo esta disminución mayor al reemplazar el 40% de la materia prima original frente al reemplazo del 20%. De entre las tres granulometrías analizadas, la que mejores resultados presentó fue la serie mixta que incorporaba una granulometría continua con fracciones de caucho reciclado en polvo y granulado. Por su parte, los compuestos con incorporación de polvo de caucho presentaron una menor resistencia mecánica en comparación con las placas de escayola que incorporan granulado, lo que podría ser debido a la formación de clústeres de partículas de polvo que implican puntos débiles de rotura [10].

Para conocer más en detalle la integración del caucho reciclado en la matriz del compuesto de escayola, en la Figura 3.3 se muestra una imagen obtenida mediante **microscopía electrónica de barrido (SEM)** del compuesto de escayola con 20% de polvo de caucho. Esta muestra fue extraída de la superficie libre de fractura obtenida tras la realización de ensayos mecánicos, sin modificar su textura y tratando de capturar la máxima información posible.

En la Figura 3.3 se puede observar la distribución de las partículas de caucho en la matriz del compuesto de escayola. En primer lugar, en la Figura 3.3a se ofrece una visión general de la superficie analizada, donde se muestra la integración del caucho en el composite, así como el desprendimiento de algunas partículas tras el ensayo de flexión. Este desprendimiento indica la formación de zonas débiles del material en las áreas donde se encuentran las partículas de polvo de caucho [38]. Un detalle más en profundidad se muestra en la Figura 3.3b donde se refleja la integración de las partículas de caucho en el material de escayola, reflejando cómo la adhesión entre la partícula de caucho y la escayola se realiza a través de la formación de cristales de dihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) que recubren la partícula de caucho durante el fraguado [39]. La formación de estos cristales con morfología acicular evidencia el correcto proceso de endurecimiento de la escayola [2], lo que indica que las partículas de caucho no perjudican el fraguado del material conglomerante, si bien puede orientar la dirección de formación de los cristales. Finalmente, en esa misma Figura 3.3b se observa un micro hueco correspondiente al desprendimiento de la partícula de caucho tras la rotura del compuesto a flexión.



(a)



(b)

Figura 3.3. Análisis SEM de los compuestos de escayola con caucho de NRVU. Fuente: elaboración propia a partir de la publicación [34].

Por otro lado, dentro de esta caracterización mecánica también se analizó la **dureza** de estos nuevos compuestos de escayola desarrollados. Esta dureza se analiza desde una doble vertiente, tomando en consideración el método recogido en la norma UNE 102042:2023 empleando un durómetro Shore C y según la norma UNE-EN 520:2005+A1, analizando la dureza frente al impacto midiendo el diámetro que produce una bola de acero de 50 mm que cae desde una altura libre de 50 cm sobre la superficie de la placa en estudio. Los resultados obtenidos en estos ensayos se muestran en la Tabla 3.1.

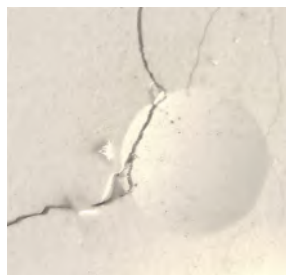
Tal y como se observa en la Tabla 3.1, se produce una disminución en la dureza superficial de los compuestos como consecuencia de la incorporación del caucho reciclado en la matriz de escayola. Esta disminución oscila entre el 8,4 – 15,5 %, lo que se encuentra en concordancia con otros estudios donde se han adicionado residuos de caucho triturados [40].

Esta reducción no puede ser considerada crítica a la hora de discriminar estos productos en el mercado, ya que en todos los casos se supera el umbral de las 45 unidades Shore C fijado como límite en estudios especializados [41], siendo la dureza superior a 70 unidades Shore C en todos los casos. Por otro lado, se observa una mejora en la dureza frente al impacto, lo que se ve reflejado en la disminución progresiva del diámetro de huella al incrementar el contenido en caucho reciclado en la matriz. Asimismo como consecuencia del carácter elástico de las partículas de caucho, se evita la rotura frágil del compuesto de escayola tras el impacto y se aumenta su capacidad de absorción de energía [37]. En ninguno de los casos analizados con incorporación de caucho de NFVU se produjo la rotura de la placa tras el impacto, lo que da una idea de la idoneidad de estos compuestos para ser empleados en la elaboración de prefabricados que puedan instalarse en zonas de tránsito frecuente de personas (Figura 3.4)

Compuesto	Dureza superficial (Ud. Shore C)	Diámetro de huella (mm)	
E0.7	83,8 ± 0,4	13,5 ± 0,4	Rotura de placa
E0.7-20%G	76,8 ± 0,6	12,8 ± 0,3	Sin rotura
E0.7-40%G	71,3 ± 1,1	11,8 ± 0,3	Sin rotura
E0.7-20%P	74,9 ± 1,0	12,9 ± 0,4	Sin rotura
E0.7-40%P	70,8 ± 0,9	12,2 ± 0,3	Sin rotura
E0.7-20%M	76,2 ± 1,0	12,6 ± 0,2	Sin rotura
E0.7-40%M	74,3 ± 0,8	11,3 ± 0,4	Sin rotura

Tabla 3.1. Dureza de los compuestos de escayola analizados.

“Gracias a las propiedades elásticas de las partículas de caucho, aumenta la capacidad de absorción de energía del compuesto de escayola, evitándose su rotura frágil tras un impacto.”



(a)



(b)



(c)

Figura 3.4. Ensayo de dureza frente a impacto: (a) E0.7, (b) E0.7-20%M, (c) E0.7-40%M.

3.2. Propiedades térmicas

En la actualidad, los edificios demandan cerca de un tercio del total de la energía mundial, consumiendo la mayor parte de esta en actividades de calefacción y refrigeración [42]. Por ello, no es de extrañar que se lleven a cabo estudios enfocados al desarrollo de materiales de construcción con un comportamiento térmico mejorado que permitan mantener una adecuada temperatura en el interior de los edificios [43]. El uso de los prefabricados de escayola como parte de la envolvente del edificio y particiones interiores es mundialmente conocido, por lo que su comportamiento térmico ha estado sujeto a múltiples investigaciones en los últimos años [44].

Para el caso concreto de este trabajo, se ha determinado la conductividad térmica y densidad aparente de los diferentes compuestos de yeso elaborados. El objetivo de esta medición es mostrar cómo la incorporación de caucho reciclado permitiría reducir la conductividad térmica de los tradicionales compuestos de yeso, contribuyendo así a aumentar la eficiencia energética de las edificaciones. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.5.

Como se puede observar en la Figura 3.5, al reemplazar parte del material de escayola original por caucho reciclado se produce una ligera reducción de la densidad aparente. Así, la máxima disminución de la densidad se obtuvo para el compuesto E0.7-40%G, de entorno al 3,5 % respecto al material de referencia sin adiciones. Esto sugiere que la incorporación de estos materiales no aumenta la masa total de los prefabricados,

“La incorporación de caucho reduce la conductividad térmica del compuesto de escayola, convirtiéndolo en un buen aislante térmico.”

por lo que no supondría un sobrecoste en los sistemas de distribución y colocación in situ de estas placas y paneles. Por su parte, la conductividad térmica sí que se ve firmemente reducida con respecto al compuesto E0.7 de referencia. Esta mejora en las propiedades térmicas es proporcional a la cantidad de caucho añadida, aumentando en los compuestos con reemplazo del material original en el 40 % en volumen. La disminución máxima alcanzada ha sido del 21,7 %, lo que supone una mejora significativa en esta propiedad para el material de construcción analizado. Estos resultados se encuentran en línea con otras investigaciones que buscan mejorar el rendimiento térmico de los sistemas constructivos empleando plásticos reciclados [45].

En cualquier caso, resulta de utilidad el empleo de herramientas de simulación como *THERM*

para comprender en detalle cuál sería el comportamiento térmico de estos prefabricados una vez instalados [46]. Para ello, se han diseñado diferentes soluciones tipo, cuyos materiales se recogen en la Tabla 3.2, a la vez que se presenta un detalle constructivo en la Figura 3.6.

La simulación del comportamiento térmico de las soluciones constructivas permite estimar la resistencia térmica del cerramiento en función de su composición. Los resultados obtenidos para las simulaciones se muestran en la Figura 3.7 y la Tabla 3.3. Habiéndose simulado un total de seis cerramientos, nombrados como: (A) tabique interior sin rotura de puente térmico; (B) tabique interior con rotura de puente térmico en un lado del muro; (C) tabique interior con rotura de puente térmico a ambos lados del muro.

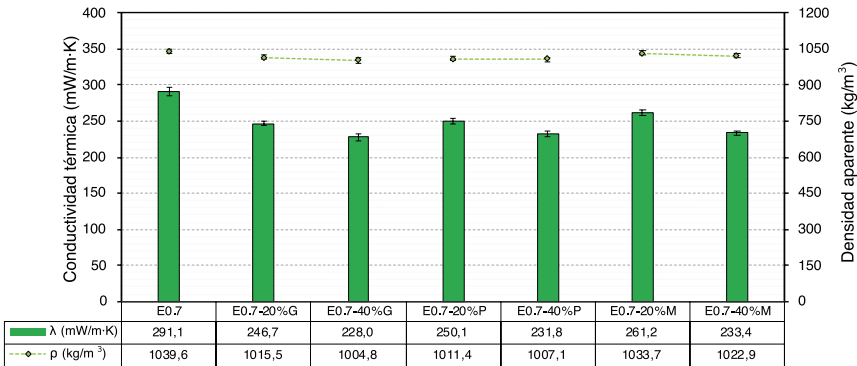


Figura 3.5. Conductividad térmica y densidad aparente de los compuestos elaborados.

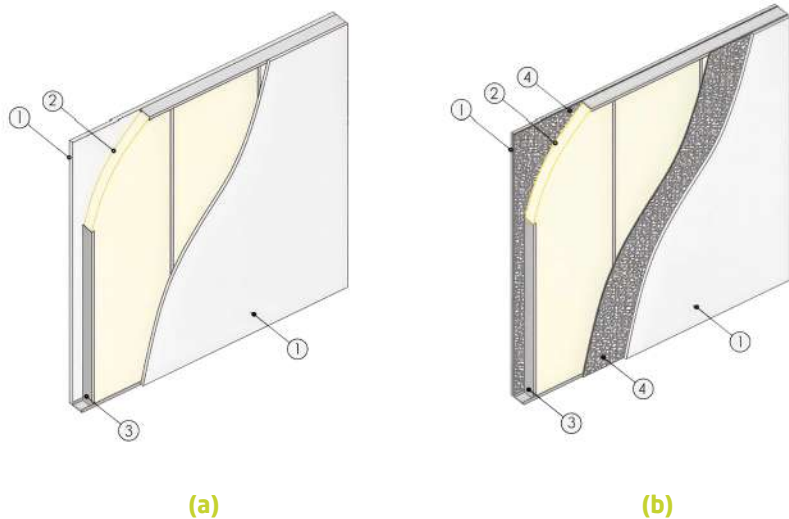


Figura 3.6. Soluciones constructivas tipo: (a) muro ligero para tabiquería interior sin rotura de puente térmico y (b) muro ligero para tabiquería interior con rotura de puente térmico.

Número	Nombre	Espesor (mm)	λ (mW/m·K)	ρ (kg/m³)
(1)	E0.7	15	291	1.040
	E0.7-40%M	15	233	1.023
(2)	Lana mineral	46,8	35	120
(3)	Perfil de acero	–	$5 \cdot 10^4$	7.850
(4)	Lámina de corcho-caucho reciclado	4	69	350

Tabla 3.2. Descripción de los materiales empleados en la simulación y sus propiedades.

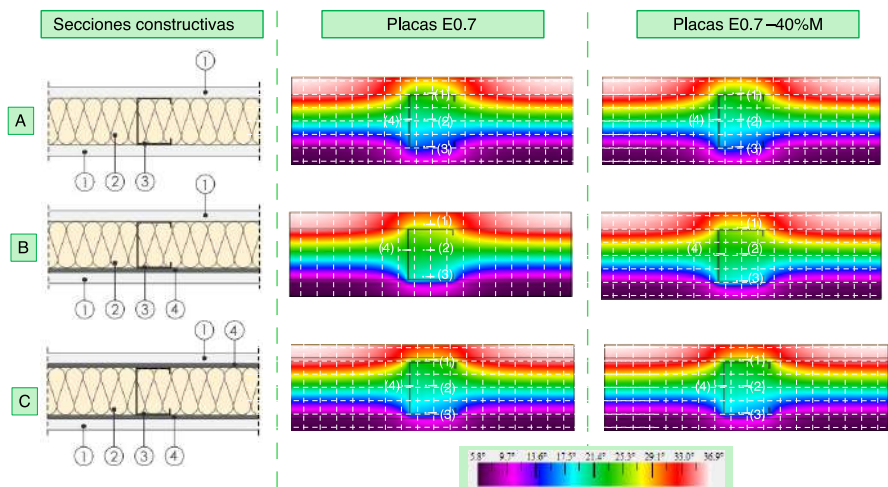


Figura 3.7. Particiones interiores junto con la simulación de su resistencia térmica en función del tipo de placa.

Punto	Partición (A)		Partición (B)		Partición (C)	
	E0.7	E0.7-40%M	E0.7	E0.7-40%M	E0.7	E0.7-40%M
(1)	24,8 °C	24,3 °C	26,7 °C	26,5 °C	23,8 °C	23,6 °C
(2)	21,2 °C	20,7 °C	21,8 °C	23,5 °C	20,4 °C	19,8 °C
(3)	14,6 °C	15,3 °C	18,3 °C	18,3 °C	16,5 °C	16,8 °C
(4)	19,5 °C	19,8 °C	22,5 °C	22,3 °C	20,2 °C	20,3 °C
R (m ² ·W/K)	0,7916	0,8448	0,8891	0,9304	0,9815	1,0123

Tabla 3.3. Temperatura en los puntos críticos de la Figura 3.7 y resistencia térmica de la partición analizada.

Como se puede apreciar en la Figura 3.7 (y se observa en detalle en la Tabla 3.3), todas las soluciones constructivas elaboradas con placas de escayola tipo E0.7-40%M presentan una resistencia muy superior a la referencia, E0.7. Sin lugar a duda, la mejor solución desde el punto de vista térmico se presenta en la partición C,

con rotura de puente térmico a ambos lados y escayola con 40 % de caucho. Esta solución presenta una resistencia térmica de 1,0123 m²·W/K, lo que supone una mejora del 22,6 % respecto a la solución convencional (partición A, sin rotura de puente térmico y escayola tradicional). Por lo tanto, esta simulación permite

vislumbrar la mejora de la eficiencia energética en estas particiones conforme se incrementa el contenido en caucho reciclado adicionado, siendo un método contrastado en otras investigaciones previas [29]. Adicionalmente, se observa cómo la diferencia de temperatura entre los extremos del perfil metálico, puntos (1) y (3) son menores en las soluciones que incorporan E0.7-40%M. Esto implica que el empleo de estos materiales reduce el salto térmico y disminuye el efecto de pared fría en estos sistemas prefabricados, lo que representa otra ventaja adicional frente a los compuestos tradicionales. Por último, se resalta la importancia de incluir la banda de rotura de puente térmico en la cara posterior de los paneles de cara a mejorar la resistencia térmica, tal y como se ha demostrado en otros estudios con sistemas de construcción ligera [47].

3.3. Propiedades frente a la acción del agua

La resistencia y durabilidad de los prefabricados de escayola se reduce considerablemente en condiciones de humedad elevada e inmersión en agua debido a la gran permeabilidad y

solubilidad de estos compuestos [48], pudiendo provocar eflorescencias y pérdidas de masa en estos materiales de construcción [49]. En la actualidad, existen dos métodos contrastados para mejorar la resistencia frente a la acción del agua en los compuestos de yeso: (i) la realización de tratamientos superficiales impermeables o (ii) la modificación del conglomerante mediante adiciones de carácter hidrófugo [50]. La impregnación superficial ha mostrado buenos resultados y se ha considerado una solución óptima, sin embargo, su problema radica en que la durabilidad de estos tratamientos no siempre es la deseada y el mantenimiento periódico puede ser costoso en el medio-largo plazo [27]. En este sentido, las adiciones de carácter impermeable se han considerado una alternativa viable para el desarrollo de compuestos de yeso con una resistencia mejorada frente a la acción del agua [51]. Así, debido a la naturaleza impermeable del caucho procedente de NFVU, es necesario analizar el comportamiento frente a la acción del agua de los nuevos compuestos de escayola elaborados en este estudio. En primer lugar, la Figura 3.8 muestra los resultados obtenidos tras el ensayo de absorción de agua por capilaridad.

“Al aumentar el contenido de caucho, se reduce la absorción de agua por capilaridad en los compuestos de escayola.”

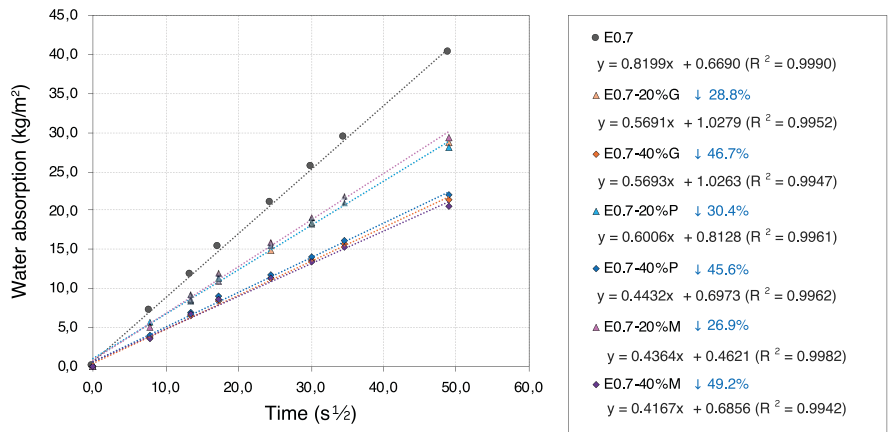


Figura 3.8. Absorción de agua por capilaridad en los compuestos estudiados.



Figura 3.9. Altura alcanzada por el agua tras el ensayo de capilaridad: (a) fotografía de las probetas y (b) termografía. Probetas ordenadas E0.7; E0.7-20%G; E0.7-40%G; E0.7-20%P; E0.7-40%P; E0.7-20%M; E0.7-40%M.

Tal y como se puede observar en la Figura 3.8, conforme se incrementa el contenido en caucho reciclado, se reduce la absorción de agua por capilaridad en los compuestos de escayola. Así, las muestras con una adición del 20 % presentan una disminución de la absorción entre un 27-30 % respecto a la referencia y los compuestos con adición del 40 % de caucho en volumen disminuyen su absorción respecto a la muestra E0.7 entre un 45-49 %. Además, se aprecia cómo no existen diferencias significativas entre los compuestos con la misma adición en volumen de caucho en función de su granulometría, si bien la mayor reducción se produjo para la muestra E0.7-40%M. Estos resultados se encuentran en concordancia con los obtenidos por López-Zaldívar et al., en su estudio [9], así como los obtenidos en otras investigaciones donde se incorporaba plásticos

reciclados para reducir la absorción de agua en compuestos de escayola [52].

Adicionalmente, es útil conocer la altura máxima que alcanza el agua tras estos ensayos de capilaridad, y no solo la masa absorbida durante el ensayo. Esta altura se ha determinado con ayuda de un calibre de precisión y termografía infrarroja, tal y como se muestra en la Figura 3.9.

Como se puede apreciar en la Figura 3.9, la altura alcanzada por el agua fue menor en los compuestos con incorporación de caucho reciclado, con independencia de la granulometría adicionada. En este sentido, se observó que para una adición del 20 %, la altura alcanzada a los 40 min fue de en torno a 90 mm y para adiciones del 40 % de en torno a 75 mm, lo que supone una fuerte reducción respecto al compuesto

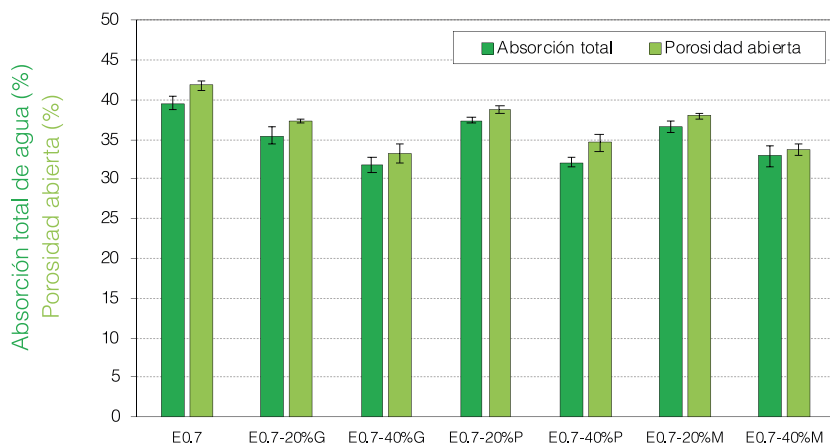


Figura 3.10. Coeficiente de absorción total de agua y porosidad abierta.

tradicional, el cual alcanzó una altura de 114 mm. Resultados similares fueron observados por Vidales et al., en su estudio con escayolas con adición de plásticos reciclados procedentes de cables [53].

Finalmente, se ha determinado también el **coeficiente de absorción total de agua y la porosidad abierta** en los compuestos elaborados. Estos resultados se muestran en la Figura 3.10. Al igual que ocurría en las anteriores propiedades analizadas, se puede observar que la incorporación de caucho reciclado mejora el comportamiento de los compuestos de yeso, disminuyendo su capacidad de absorción de agua y porosidad abierta con respecto al material de referencia E0.7. En este sentido, se puede afirmar que la incorporación de estas adiciones de caucho puede suponer una potencial fuente de ventaja competitiva en la elaboración de prefabricados en cuartos húmedos, donde los requisitos para obtener compuestos impermeables son cada vez más exigentes.

3.4. Propiedades frente a la acción del fuego

Por último, antes de lanzar una pieza de construcción modular como puede ser un panel prefabricado, es conveniente realizar

ensayos de caracterización frente a la acción del fuego y conocer la respuesta del material ante tales efectos. En este sentido, la legislación estatal indica que en España los elementos constructivos deben cumplir las condiciones de reacción al fuego que se establecen en la *Tabla 4.1. del Código Técnico de la Edificación en su Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio* (CTE DB-SI).

En el contexto de desarrollo de esta guía de aplicación, se ha llevado a cabo un ensayo de reacción al fuego según la norma ISO 5660-1:2015 en el instituto tecnológico AIDIMME, como se indicó anteriormente. Las muestras seleccionadas para los ensayos fueron: E0.7, E0.7-20%P y E0.7-40%P. Estas muestras se eligieron por ser las más desfavorables, teniendo en cuenta que el tamaño de las partículas de caucho podría influir en su combustión.

En la Figura 3.11 se muestra el estado de las probetas de cada tipo de escayola analizada, de superficie 10×10 cm² (espesor 18 mm), antes y después del ensayo. En la Tabla 3.4 se muestran los resultados obtenidos. En el caso de la muestra E0.7-40%P, el ensayo se realizó por duplicado con el objetivo de confirmar el resultado (se muestra el valor promedio).

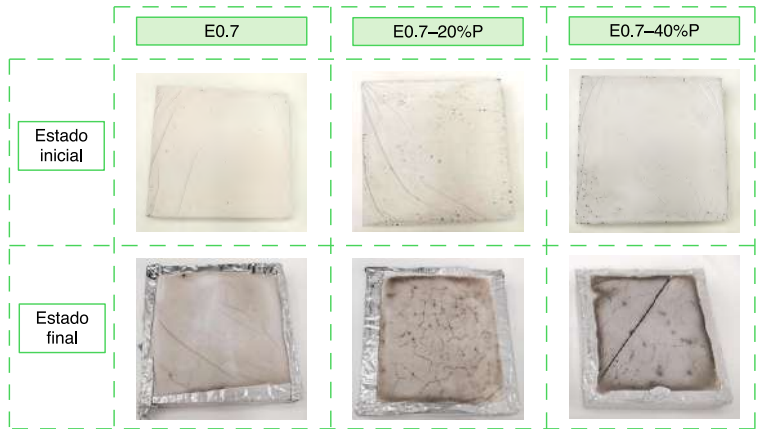


Figura 3.11. Estado de las muestras antes y después del ensayo del cono calorimétrico.

<i>Propiedad medida</i>	<i>E0.7</i>	<i>E0.7-20%P</i>	<i>E0.7-40%P</i>
Masa inicial de la muestra (g)	196,0	195,5	196,1
Masa final de la muestra (g)	184,5	184,4	181,4
Pérdida de masa (%)	5,9	5,7	7,5
Pérdida de masa (g/m ²)	1300,9	1255,7	1668,6
Tasa media de pérdida de masa (g/m ² -s)	2,17	2,09	2,78

Tabla 3.4. Resultados obtenidos tras el ensayo del cono calorimétrico.

En la Tabla 3.4 se presentan los resultados tras el ensayo del cono calorimétrico donde se puede observar una pérdida de masa, diferente para las tres muestras, debida a la pérdida de agua de la probeta y la consecuente transformación de yeso dihidrato en anhidrita. Durante la realización del ensayo no se observó la emisión de humos, salvo en una de las dos probetas de la muestra E0.7-40%P que emitió un poco de humo, lo que resulta esencial para la aplicación de estos prefabricados de escayola en el interior de viviendas. Así mismo, cabe señalar una mayor degradación de los compuestos con la incorporación de caucho reciclado tras el ensayo, un efecto similar fue observado por Castellón et al., en su investigación [32]. Y es que, en otros estudios llevados a cabo con la adición de cauchos reciclados, se constató que los compuestos de yeso perdían en mayor medida su resistencia mecánica e integridad conforme se incrementaba el contenido en material reciclado añadido en las muestras [30]. En cualquier caso, el principal resultado es que las placas no se queman y mantienen su forma.

Resulta especialmente relevante obtener una previsión de la clasificación frente al fuego acorde con la normativa actual. El sistema de clasificación de Euroclases (EN 13501-1), establece un procedimiento de ensayo muy costoso en el que se registran cuatro parámetros:

- FIGRA (Fire Growth Rate), Índice de crecimiento del incendio
- THR (Total Heat Release), Calor total desprendido
- SMOGRA (Smoke Growth Rate), Índice de crecimiento de los humos
- TSP (Total Smoke Production), Producción total de humos.

Para poder otorgar una determinada clase (B, C, D) deben cumplirse conjuntamente los requisitos establecidos tanto para el parámetro FIGRA como para el parámetro THR recogidos en la Tabla 3.5. Asimismo, para establecer una determinada subclase de humos (s1, s2, s3), deben cumplirse conjuntamente los requisitos establecidos

tanto para el parámetro SMOGRA como para el parámetro TSP incluidos en dicha tabla.

Clase	FIGRA (W/s)	THR (MJ)	Subclase	TSP (m²)	SMOGRA (m²/s²)
B	≤120	≤7,5	s1	≤50	≤30
C	≤250	≤15	s2	≤200	≤180
D	≤750	-	s3	>200	>180

Tabla 3.5. Sistema de clasificación de Euroclases (EN 13501-1).

Atendiendo a los valores obtenidos en los parámetros del ensayo del cono calorimétrico, se puede predecir que tanto el parámetro THR como el FIGRA obtendrían unos valores muy bajos que llevarían a conseguir una clasificación B. En cuanto a la producción de humos, se puede predecir una subclase

s1 atendiendo a la producción total de humos (TSP). Así, se obtendría una potencial clasificación según la Euroclase: **B-s1, d0** (donde d0, se obtiene por observación del comportamiento del material; sin producción de partículas inflamadas, teniendo en cuenta la naturaleza del material y comportamiento observado en el ensayo a pequeña escala del cono calorimétrico). Así, los materiales elaborados en este estudio cumplen con los requisitos para su aplicación en viviendas conforme indica la *Tabla 4.1 del Código Técnico de la Edificación* (CTE DB-SI). Cabe destacar que esta clasificación se ha obtenido a través de un método interno de previsión desarrollado por AIDIMME siendo, por tanto, necesario validarlo en el sistema Euroclases (EN 13501-1) en el caso concreto de elaborar prefabricados que empleen estas materias primas.





4

Como se ha indicado anteriormente, en este trabajo no solamente se aborda el reemplazo parcial de la materia prima original con base escayola, por materias primas secundarias de caucho reciclado de NFVU, sino que también **se analiza el potencial de reciclabilidad de los compuestos desarrollados.**

Para ello, se plantea tanto la posibilidad de triturar y tamizar el compuesto de escayola con caucho reciclado para su reincorporación en la fabricación de nuevos productos con base yeso, como la posibilidad de triturar, tamizar y separar el material de escayola del caucho para posteriormente desecarlo y obtener de nuevo el conglomerante de hemihidrato en polvo.

El empleo del material de yeso reciclado como sustituto del conglomerante comercial es una opción cada vez más aceptada y que está siendo ampliamente explorada por los investigadores [24]. Así, algunas empresas han llegado a desarrollar placas con hasta un 28 % de yeso reciclado en la matriz del compuesto base [54]. Este trabajo contribuye a buscar una solución al problema medioambiental derivado de la generación de grandes cantidades de residuos de yeso (más de 15 millones de toneladas acaban cada año en vertederos del mundo [55]), así como a impulsar la incorporación de materias primas secundarias en el desarrollo de productos de construcción. Esto es posible gracias a que los residuos de los productos de yeso y escayola constituyen un sistema circular de bucle cerrado

(*close loop*) obteniendo materiales aptos para su aplicación en la edificación [56].

A pesar de todo, gran cantidad de residuos de construcción y demolición no están potencialmente disponibles debido a las limitaciones económicas o fallos del mercado. Aunque, técnicamente es viable el reciclaje de los productos con base yeso, se han encontrado barreras que dificultan su implementación en la industria, tales como: (i) alto coste percibido para el reciclado; (ii) baja demanda de materias primas secundarias; (iii) complicaciones normativas, y (iv) alta competencia internacional y disponibilidad de recursos naturales [57]. Esto hace que en muchas ocasiones la eliminación en vertederos se entienda como la opción más económica, existiendo a su vez una desconfianza por parte del consumidor en cuanto a la calidad de estos recursos reciclados [58]. Es por tanto una necesidad llevar a cabo estudios que permitan conocer el potencial de aplicación de estas materias primas recicladas y sus propiedades más relevantes. Más concretamente, para el caso de los productos con base yeso, existen discrepancias sobre las temperaturas óptimas y tiempos de calentamiento necesarios para obtener de nuevo el polvo hemihidrato [59], si bien es cierto que estas pueden variar como consecuencia de los aditivos incorporados para la elaboración de los productos originales.

Por ello, en este capítulo se aborda el estudio de la reciclabilidad de compuestos de yeso con

caucho proveniente de NFVU. Se plantea así una campaña experimental en la que se ha analizado el cumplimiento de las prestaciones mecánicas de los compuestos elaborados conforme a la norma UNE-EN 13279-2. Adicionalmente, se ha realizado una caracterización química del material conglomerante y se han obtenido imágenes mediante análisis SEM de los compuestos elaborados en cada una de las tres series propuestas indicadas en la Figura 4.1. Las tres series se estructuran de la siguiente manera:

- **Serie 1:** fabricación de compuestos de escayola virgen con caucho reciclado (Tabla 2.2) y evaluación de sus propiedades. Los resultados se toman como referencia para evaluar la reciclabilidad.
- **Serie 2:** trituración y tamizado de los compuestos fabricados en la Serie 1 para recuperar el caucho y fabricar otros compuestos adicionando escayola comercial y agua (20 y 40 % en volumen de caucho recuperado). Las partículas de caucho recuperadas contienen restos de la escayola empleada (yeso dihidrato).
- **Serie 3:** trituración y tamizado de los compuestos fabricados en la Serie 1, separando la escayola (trituración, tamizado, separación del caucho, molienda en molino de

bolas y desecado durante 24 horas a 180 °C) para fabricar otro compuesto constituido por esa escayola 100 % reciclada con caucho de NFVU no utilizado previamente (20 y 40 % en volumen).

4.1. Caracterización mecánica de la Serie 1: compuestos de referencia

En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos para la caracterización mecánica de las muestras elaboradas en la Serie 1. Esta serie de probetas normalizadas de $4 \times 4 \times 16$ cm³ se elaboraron empleando las dosificaciones incluidas en la metodología y su composición es idéntica a la empleada para la elaboración de las placas prefabricadas analizadas en la sección 2.2 (Tabla 2.2). Los resultados para la resistencia a flexión, compresión y dureza superficial se muestran en la Figura 4.2.

Como se puede observar en la Figura 4.2, se produce una disminución progresiva de la resistencia mecánica conforme se incrementa el contenido en caucho reciclado adicionado. De esta manera, los compuestos con sustitución del 40 % de la materia prima original presentaron resistencias a flexión y compresión inferiores que aquellos con reemplazo del 20 %.

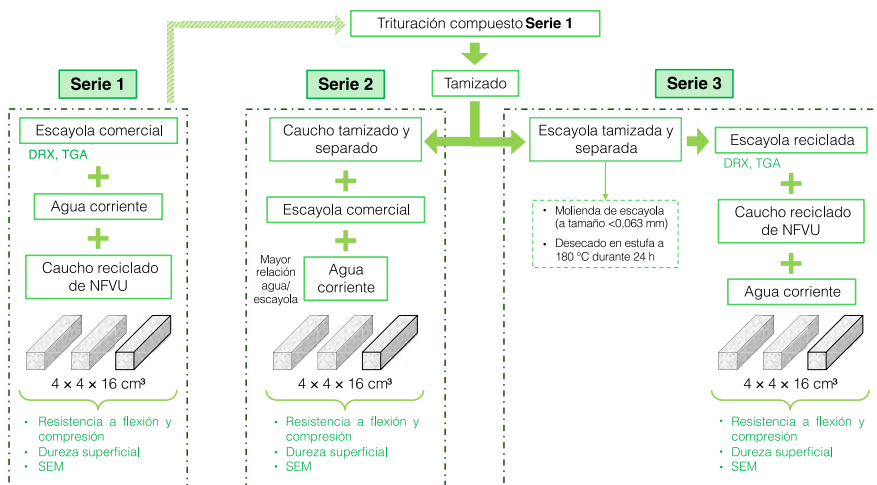


Figura 4.1. Esquema del plan de trabajo para la evaluación de la reciclabilidad.

De entre todas las muestras elaboradas, las que incorporaron caucho reciclado en su fracción de polvo ($\varnothing < 0,8 \text{ mm}$) fueron las que mejores resultados presentaron. Estos resultados se encuentran en concordancia con otros trabajos [10]. No obstante, en comparación con el compuesto de referencia sin adiciones (100 % escayola) la resistencia mecánica a flexión y compresión se redujo hasta en un 56,6 % y un 49,8 %, respectivamente, para la muestra con sustitución del 40 % de caucho. Los compuestos

con caucho adicionado en granulado fueron los que peor comportamiento mecánico mostraron, presentando la solución híbrida que contiene ambas granulometrías (polvo + granulado) un comportamiento similar a los compuestos con adición de polvo de caucho. En lo referente a la dureza, esta se vio igualmente reducida conforme se añadió caucho en la matriz, lo cual supone un resultado esperado en base a otros trabajos realizados previamente [37]. La máxima disminución en la dureza superficial con

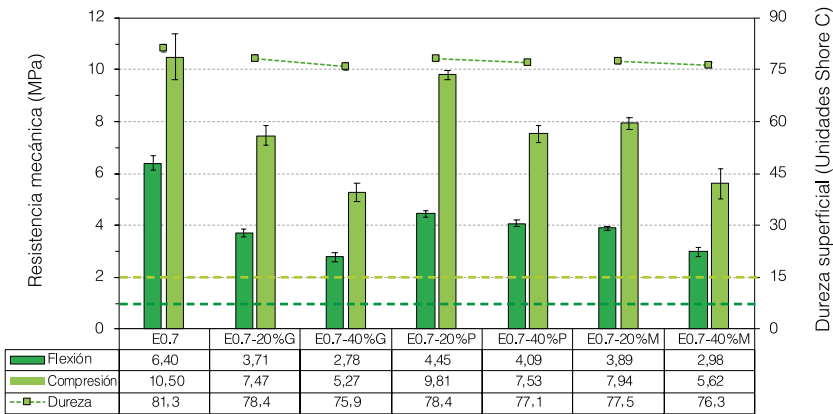


Figura 4.2. Resultados obtenidos en los ensayos de caracterización mecánica de las muestras de la Serie 1 (se señalan valores mínimos recomendados de 1 MPa para flexión y 2 MPa para compresión según UNE EN 13279-2).

respecto a la referencia E0.7 (100 % escayola) se produjo en el compuesto E0.7-40%G y fue de un 6,6 %.

En la Figura 4.3, se muestra una imagen de las matrices de los diferentes compuestos elaborados para la Serie 1, siendo posible observar su composición interior. Como se puede apreciar, existe una distribución homogénea de las partículas de caucho reciclado adicionado en el compuesto, con independencia del tamaño empleado. Si bien es cierto que se aprecian también huecos en la matriz ocasionados tras la rotura de la probeta en el ensayo a flexión y que pueden ocasionar el desprendimiento de las partículas de caucho. No obstante, en términos generales se observa una buena integración de las partículas en la matriz.

Para comprender en profundidad esta integración del caucho reciclado en el compuesto de escayola y analizar su microestructura, se han llevado cabo una serie de análisis SEM. En primer lugar, en la Figura 4.4 se muestran imágenes extraídas de la matriz de E0.7-40%M. Esta dosificación fue la elegida para estos análisis, ya que presentaba en su composición todos los tamaños de partícula empleados en este estudio. Las muestras analizadas fueron extraídas del interior de los compuestos sin dañar su textura superficial y tratando de ser lo más representativas posible de la composición interior de los compuestos estudiados.

En la Figura 4.4a se muestra la matriz de escayola, la cual presenta una estructura compacta y homogénea. Se aprecia la buena integración

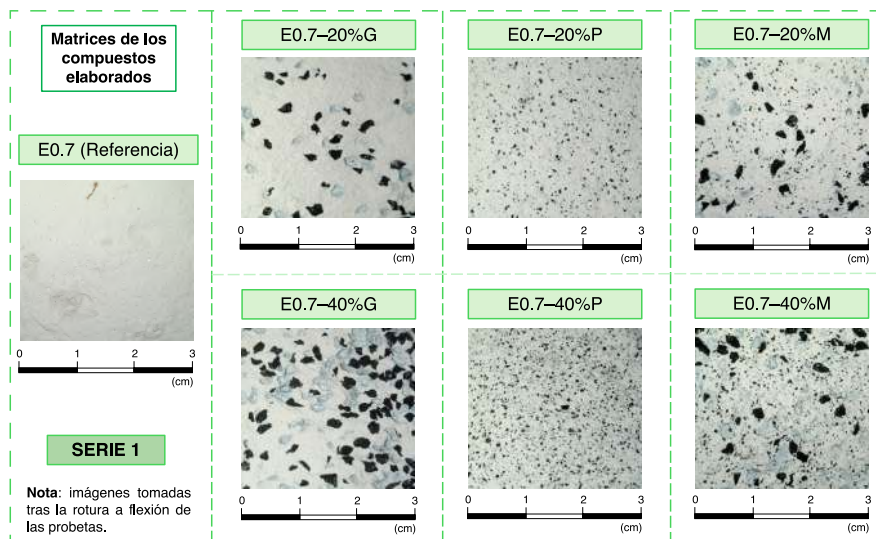


Figura 4.3. Imagen de las matrices de los compuestos tras el ensayo de resistencia a flexión (Serie 1).

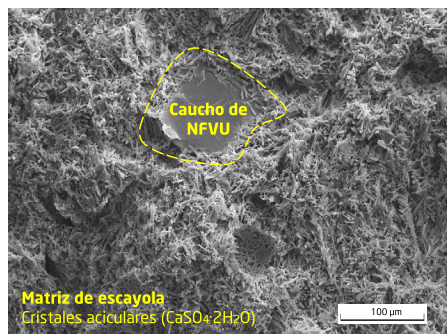
de las partículas de caucho en la matriz, estando totalmente embebidas entre los cristales de dihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) que se forman durante el proceso de fraguado. Adicionalmente, se observan algunos poros que son formados comúnmente en el interior de la matriz de los compuestos con base yeso como consecuencia de la evaporación del agua libre de amasado [60]. En la Figura 4.4b se aprecian los cristales en forma de aguja comúnmente encontrados en los compuestos de escayola, que evidencian un correcto proceso de fraguado de este material conglomerante [2]. Adicionalmente, se muestra en detalle la interfase entre el caucho y la matriz, apreciándose la buena integración entre ambos y el crecimiento de estos cristales aciculares en la superficie perimetral de la partícula de caucho adicionado. Así, en concordancia con los resultados obtenidos en otras investigaciones [39], se denota una buena integración de ambas materias primas y su viabilidad para ser empleadas en la elaboración de productos de construcción sostenibles.

4.2. Caracterización mecánica de la Serie 2: compuestos reciclados

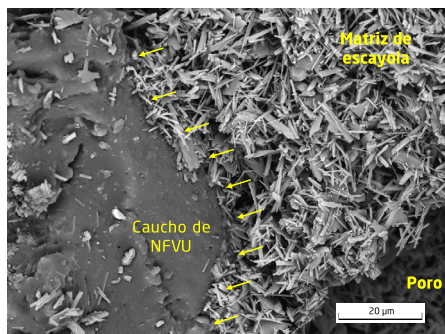
En este apartado se muestran los resultados obtenidos para las muestras elaboradas en la Serie 2, en las cuales se reemplazó hasta un 40 % de escayola por caucho recuperado de las

probetas de la Serie 1. Las probetas de la Serie 1 se trituraron con ayuda de un molino de bolas de acero (máquina Micro Deval) y, posteriormente, se tamizaron con ayuda de una tamizadora de vaivén empleando la serie de tamices recogida en la norma UNE EN 933-1. El caucho recuperado se separó por tamaños en bolsas correspondientes al granulado y polvo de caucho empleados en este trabajo.

Cabe destacar que durante la preparación de las muestras elaboradas en esta Serie 2, como era previsible, hubo que **aumentar el contenido en agua de amasado hasta alcanzar una relación agua/escayola de 0,8**. Este incremento en el contenido en agua fue consecuencia de la adición de dihidrato residual presente en las partículas de caucho durante el proceso de tamizado y reciclado. Este dihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se corresponde con la formulación del compuesto de escayola endurecido y al incorporarse en el proceso de amasado con el hemihidrato comercial ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), actúa como acelerante de fraguado, reduciendo la trabajabilidad de la muestra. Por otro lado, únicamente se elaboraron probetas con el caucho recuperado durante este proceso de amasado, siendo el



(a)



(b)

Figura 4.4. Análisis SEM para la muestra E0.7-40%M. Aumentos: (a) ×500; (b) ×2000.

material de referencia la escayola elaborada en la Serie 1 (E0.7). Los resultados obtenidos para las resistencias mecánicas se muestran en la Figura 4.5.

Como se puede apreciar en la Figura 4.5, al aumentar la relación agua/escayola e incorporar impurezas de dihidrato en la composición, los compuestos de la Serie 2 presentaron unas menores resistencias mecánicas. La resistencia a flexión y compresión se

redujo significativamente con respecto a los compuestos elaborados en la Serie 1. No obstante, en todos los casos analizados se superaron en media los valores mínimos exigidos por la normativa actual (UNE EN 13279-2). Las mayores resistencias se presentaron en las muestras con incorporación del compuesto en polvo RS2_E0.8-20%P y RS2_E0.8-40%P. En lo referente a la dureza superficial, si bien se observó una ligera disminución con respecto a los materiales

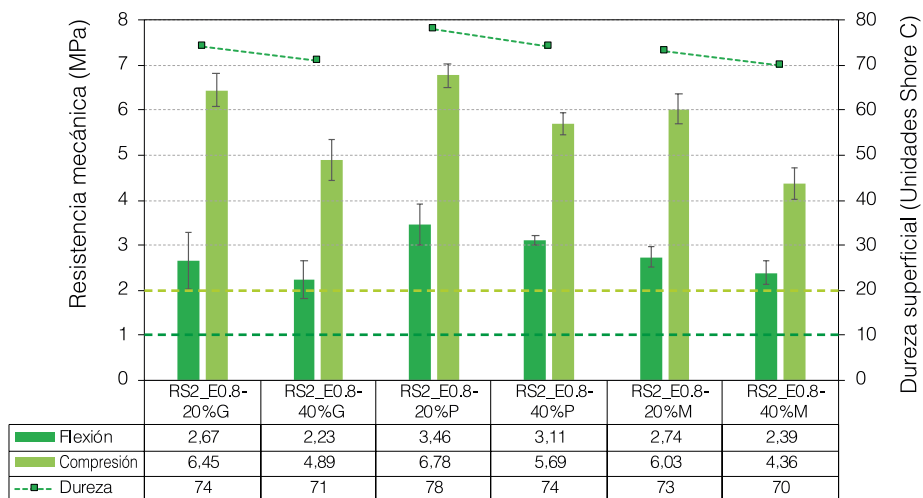


Figura 4.5. Resultados obtenidos en los ensayos de caracterización mecánica de las muestras de la Serie 2 (se señalan valores mínimos recomendados de 1 MPa para flexión y 2 MPa para compresión según UNE EN 13279-2).

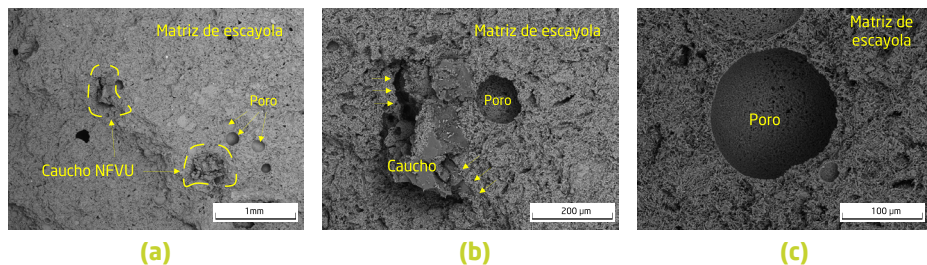


Figura 4.6. Análisis SEM de la muestra RS2_E0.8-40%M. Aumentos: (a) $\times 50$; (b) $\times 250$; (c) $\times 500$.

presentados en la Serie 1, en ningún caso fue superior al 8 %. Así, de acuerdo con estudios realizados anteriormente, los compuestos con base yeso son susceptibles de experimentar este proceso de reciclaje (trituración-tamizado) para su reincorporación al proceso de fabricación de nuevos materiales [61]. Sin embargo, a gran escala, sería necesario hacer ensayos en placas y paneles prefabricados para identificar la composición óptima que podría reciclarse en cada dosificación.

Al igual que en el caso anterior, se presentan en la Figura 4.6 unas imágenes de microscopía que permiten conocer la estructura interna de los compuestos elaborados en esta serie. Las imágenes fueron tomadas para la muestra RS2_E0.8-40%M por ser la más representativa.

Se puede observar en la Figura 4.6 una buena integración del caucho en la matriz a través de la formación de cristales de dihidrato en la interfase. También se aprecia una mayor porosidad en comparación con la Serie 1 como consecuencia de la mayor relación agua/escayola empleada debido a la escayola residual añadida. Estas imágenes muestran por tanto una matriz más débil, lo que guarda relación con las menores resistencias mecánicas obtenidas en la Figura 4.5.

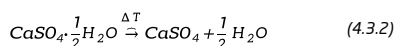
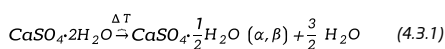
4.3. Caracterización química y mecánica de la Serie 3: compuestos reciclados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para las muestras elaboradas en la Serie 3, donde se ha empleado un 100 % de escayola reciclada obtenida de la trituración y

molienda de probetas de las Series 1 y 2, junto con caucho reciclado de NFVU (sin utilizar). En primer lugar, se lleva a cabo la caracterización de la escayola reciclada y posteriormente, se hace el estudio de las propiedades de los compuestos desarrollados.

4.3.1 Caracterización fisicoquímica del material de escayola reciclado de la Serie 3

En este apartado se realiza una caracterización físico-química para conocer la eficiencia del proceso de reciclado del material de escayola empleado para elaborar los compuestos de la Serie 3. Los compuestos de esta última serie fueron elaborados exclusivamente con el caucho reciclado de NFVU empleado en este trabajo y escayola 100 % reciclada procedente del material de yeso recuperado de las Series 1 y 2. Para ello, las muestras ensayadas de estas dos series se trituraron y tamizaron, separando el caucho en las muestras de la Serie 2, hasta obtener un tamaño de partícula inferior a 0,063 mm empleando la serie de tamices normalizada según la norma UNE-EN 933-1:2012. Posteriormente, este polvo de escayola dihidrato fue introducido en estufa durante 24 horas a una temperatura de 180 ± 1 °C (humedad relativa 20 ± 2 %). El resultado fue la transformación del polvo de dihidrato en hemihidrato, obteniéndose de nuevo una materia prima reciclada apta para la elaboración de nuevos compuestos de escayola. El fundamento teórico se sustenta en el siguiente esquema básico de reacciones [62]:



Como se puede apreciar, al aportar calor se puede revertir la reacción y recuperar de nuevo el hemihidrato original, a la vez que, al incrementar aún más la temperatura se puede conseguir formar anhidrita. En la Figura 4.7, se muestran los resultados obtenidos tras el ensayo de difracción de rayos X de la materia prima original (suministrada por el fabricante) y la materia prima secundaria, obtenida del reciclaje de la escayola endurecida de las Series 1 y 2 según el proceso descrito anteriormente.

Tal y como se puede apreciar en la Figura 4.7, la escayola original suministrada por el fabricante y la escayola reciclada y desecada presentan el mismo esquema de difracción, con picos más intensos en ángulos $2\theta = 14,75^\circ$; $25,66^\circ$; $29,70^\circ$; $31,86^\circ$ y $49,30^\circ$, correspondientes a yeso hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$). Esto refleja que el proceso llevado a cabo para la recuperación y revalorización del material

de escayola original se realizó de manera satisfactoria. Es muy poco probable que haya partículas de caucho que pasen por el tamiz de $0,063 \text{ mm}$, en cualquier caso, las posibles partículas de caucho en la escayola reciclada no condicionarían su aplicación posterior para el desarrollo de compuestos y prefabricados como los planteados en este trabajo.

Adicionalmente, se ha llevado a cabo un análisis termogravimétrico (TGA) de estas materias primas, cuyos resultados se analizan en la Tabla 4.1.

Tal y como se puede apreciar en la Tabla 4.1, en ambas materias primas se produce una primera pérdida de masa, correspondiente a la deshidratación del yeso hemihidrato (ecuación 4.3.2) para dar anhidrita, a una temperatura inferior a 200°C , con máxima velocidad de pérdida de masa en torno a $125\text{-}130^\circ\text{C}$ y con

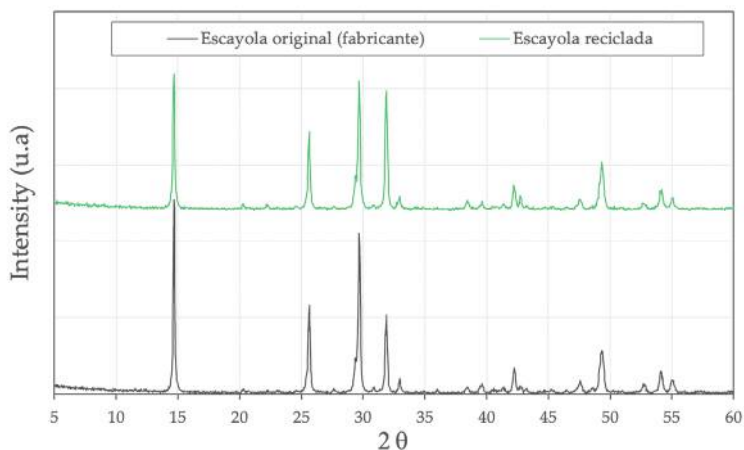


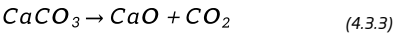
Figura 4.7. Difractograma de las muestras de escayola en polvo original, suministrada por el fabricante, y el polvo de escayola obtenido como materia prima secundaria tras el proceso de reciclaje.

Muestra	Pérdida masa total (%)	Intervalo temperatura (°C)	Temperatura máxima (°C)	Pérdida masa parcial (%)	Efectos térmicos asociados	Comentarios
Escayola original	11,100	< 200	129,18	6,590	Endotérmico	HH a anhidrita
		200-550	365,19	–	Exotérmico	Transición de fase de la anhidrita
		550-800	702,05	4,116	Endotérmico	CaCO ₃ a CaO
Escayola reciclada y desecada	9,651	< 200	125,14	6,177	Endotérmico	HH a anhidrita
		200-550	365,86	–	Exotérmico	Transición de fase de la anhidrita
		550-800	681,88	2,832	Endotérmico	CaCO ₃ a CaO

* Nota: HH = hemihidrato.

Tabla 4.1. Resultados TGA de las materias primas de escayola empleadas.

unas pérdidas de masa similares en torno al 10 %. Adicionalmente, en ambas muestras se observa la transición exotérmica del hemihidrato a anhidrita insoluble, en torno a 360 °C, sin pérdida de masa asociada, lo que indicaría que las muestras contienen hemihidrato-β. Finalmente, ambos compuestos presentan una pérdida de masa comprendida entre 550 y 800 °C, inferior al 5 % en todas las muestras, correspondiente a la descomposición de carbonato de calcio presente en el yeso para dar lugar a óxido de calcio, según la reacción (ecuación 4.3.3).



Este comportamiento similar presentado por ambas materias primas, vuelve a representar un síntoma de la calidad del proceso de reciclaje llevado a cabo y la viabilidad de recuperar el material con base yeso original en compuestos elaborados con caucho procedente de NFVU.

4.3.2 Caracterización química y mecánica de los compuestos reciclados de la Serie 3

En este apartado, se muestran los resultados obtenidos para las muestras elaboradas en la Serie 3, las cuales pueden visualizarse en imagen de la Figura 4.8.

En la Figura 4.8, se puede apreciar una distribución homogénea del caucho en la matriz de escayola. Al igual que ocurría con los compuestos de la Serie 1, se aprecia una buena integración del caucho reciclado en la matriz, destacándose una mayor porosidad con respecto a las muestras elaboradas con escayola sin reciclar. Esto trae consigo la necesidad de conocer la efectividad del proceso de reciclado de escayola empleado y para ello, se han realizado análisis químicos del material escayola de la Serie 3 una vez endurecido. Cabe destacar que estos compuestos fueron elaborados con polvo de

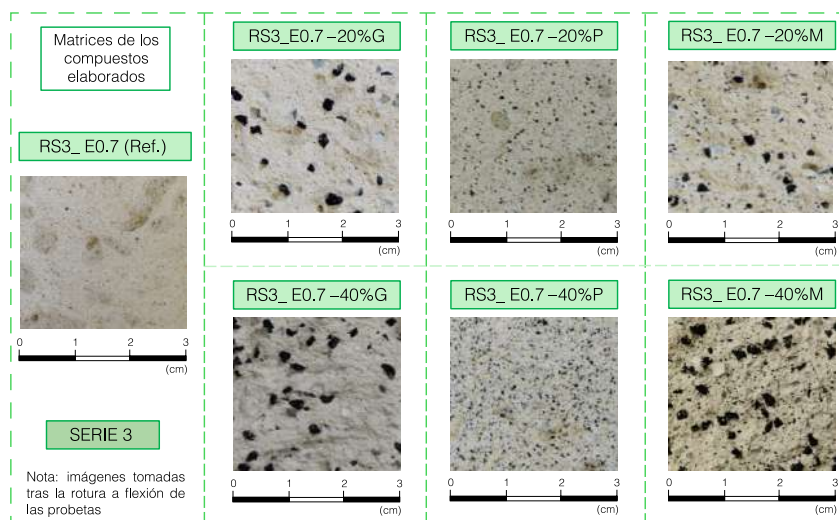


Figura 4.8. Imagen de las matrices de los compuestos tras el ensayo de resistencia a flexión (Serie 3).

escayola obtenido tras el proceso de trituración, tamizado y desecado de las partículas de tamaño inferior a 0,063 mm de los materiales empleados en la elaboración de placas. Los resultados obtenidos tras el ensayo de difracción de rayos X de las muestras en estado endurecido se muestran en la Figura 4.9 y los obtenidos para la TGA en la Tabla 4.2.

En la Figura 4.9, se observa que la muestra de escayola analizada para la Serie 3 presenta un esquema de difracción distinto al obtenido en la Figura 4.7, correspondiente a yeso dihidrato, con picos más intensos a valores de $2\theta = 11,60^\circ$, $20,70^\circ$ y $29,10^\circ$.

En lo referente al TGA analizado en la Tabla 4.2, la muestra está compuesta fundamentalmente por yeso dihidrato, presentando una primera pérdida de masa mucho mayor (en torno al 23 %). Esto es debido a que se produce en primer lugar la deshidratación del yeso dihidrato para formarse hemihidrato (ecuación 4.3.1) y a continuación la deshidratación de éste (ecuación 4.3.2), que se observa como un hombro del primero en la línea de la derivada de la masa. La máxima velocidad

de pérdida de masa para la deshidratación del dihidrato está alrededor de 126°C y la del hemihidrato aproximadamente 10°C más. Además, se observa la transición exotérmica del hemihidrato a anhidrita insoluble, en torno a 360°C , sin pérdida de masa asociada, lo que indicaría que las muestras contienen hemihidrato- β . Y una pérdida de masa comprendida entre 550 y 800°C inferior al 5 % correspondiente a la descomposición de carbonato de calcio presente en el yeso para dar lugar a óxido de calcio, según la reacción (ecuación 4.3.3).

A continuación, en la Figura 4.10, se presentan los resultados obtenidos para la caracterización mecánica de los compuestos de la Serie 3 elaborados con 100 % de escayola reciclada.

Como se puede observar en la Figura 4.10, aunque la relación agua/escayola se mantuvo en 0,7 en masa (igual que en la Serie 1), las resistencias mecánicas obtenidas fueron inferiores a las alcanzadas por la serie de referencia (Serie 1). No obstante, en todos los casos analizados se superaron los valores

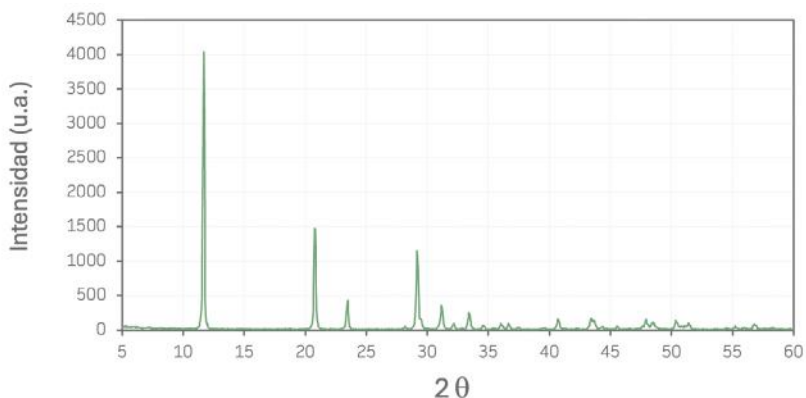


Figura 4.9. Difractograma de las muestras de escayola de la Serie 3.

Muestra	Pérdida masa total (%)	Intervalo temperatura (°C)	Temperatura máxima (°C)	Pérdida masa parcial (%)	Efectos térmicos asociados	Comentarios
Escayola reciclada	22,92	<200	126,49	18,62	Endotérmico	DH a HH
			135,90			HH a anhidrita
		200-550	361,15	–	Exotérmico	Transición de fase de la anhidrita
		550-800	684,57	–	Endotérmico	CaCO ₃ a CaO

* Nota: DH = dihidrato; HH = hemihidrato.

Tabla 4.2. Resultados TGA de la escayola de los compuestos de la Serie 3.

mínimos exigidos por la normativa (UNE EN 13279-2), con una disminución en los valores de resistencia a flexión y compresión con respecto a los compuestos homólogos analizados en la Serie 1. La muestra sin caucho RS3_E0.7 de la Serie 3 (elaborada 100 % con escayola reciclada) fue la que presentó mayores valores de resistencia, disminuyéndose ésta de forma progresiva conforme se incrementaba el contenido en caucho. Al igual que ocurría en los compuestos anteriores, los materiales

de escayola con incorporación de polvo de caucho (<0,8 mm) fueron los que presentaron mejores resultados mecánicos. La disminución de la resistencia mecánica en compuestos elaborados con materiales de base yeso reciclado ha sido observada en otros estudios previos, asociándose, entre otros factores, a un aumento de la porosidad en el material endurecido y un acortamiento de los cristales de dihidrato conforme se incrementa el proceso de reciclado [63]. Finalmente, también se

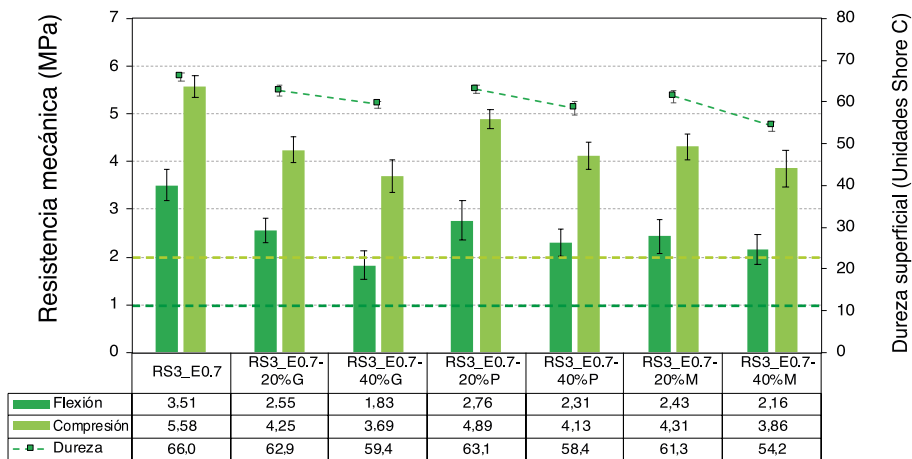


Figura 4.10. Resultados obtenidos en los ensayos de caracterización mecánica de las muestras de la Serie 3 (se señalan valores mínimos recomendados de 1 MPa para flexión y 2 MPa para compresión según UNE EN 13279-2).

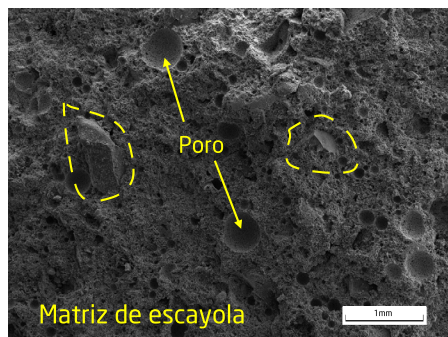
observa una disminución de la dureza superficial en estos materiales con respecto a la Serie 1, si bien es cierto que en ninguna dosificación esta diferencia fue superior al 15 %.

Finalmente, y al igual que se hizo con las Series 1 y 2, se ha realizado un análisis SEM de los compuestos elaborados en esta serie para conocer su microestructura. Así, se han tomado imágenes de la muestra con 40 % de sustitución por caucho mixto (polvo y granulado), por considerarse la más representativa. Los resultados de este análisis se muestran en la Figura 4.11.

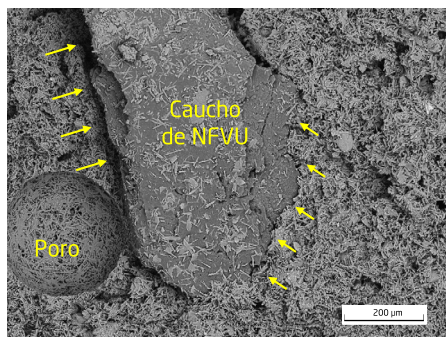
En la Figura 4.11a se muestra una imagen detallada de la superficie del compuesto con un número bajo de aumentos, esto permite apreciar bien la mayor porosidad de estos materiales de escayola elaborados con materia prima 100 % reciclada y que tienen su repercusión en una disminución de las propiedades mecánicas. En las Figura 4.11b y Figura 4.11c se muestran en detalle estos poros, donde se produce una orientación preferente de los cristales de dihidrato al

perder el agua de amasado. No obstante, en el detalle mostrado en la Figura 4.11b se aprecia una buena integración de las partículas de caucho en la matriz, con la formación de cristales en la superficie de las partículas de caucho. Si bien es cierto que, en la Figura 4.11d se muestra un acortamiento de los cristales de dihidrato y una interfase más débil entre las partículas de caucho y la matriz, lo que afecta en la reducción de la resistencia a flexión y compresión.

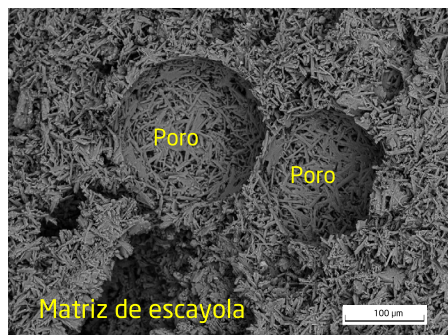
Por tanto, es posible elaborar compuestos con 100 % de materia prima reciclada y cumplir con las exigencias de la normativa actual, si bien es cierto que sus resistencias mecánicas pueden verse comprometidas y su aplicación final debe ser estudiada previamente con detalle para clarificar su idoneidad.



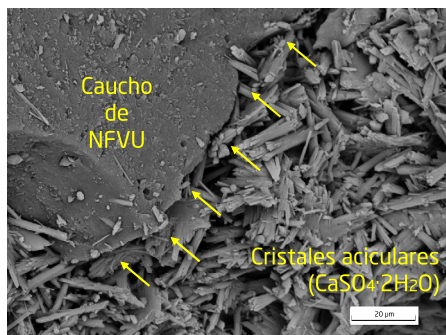
(a)



(b)



(c)

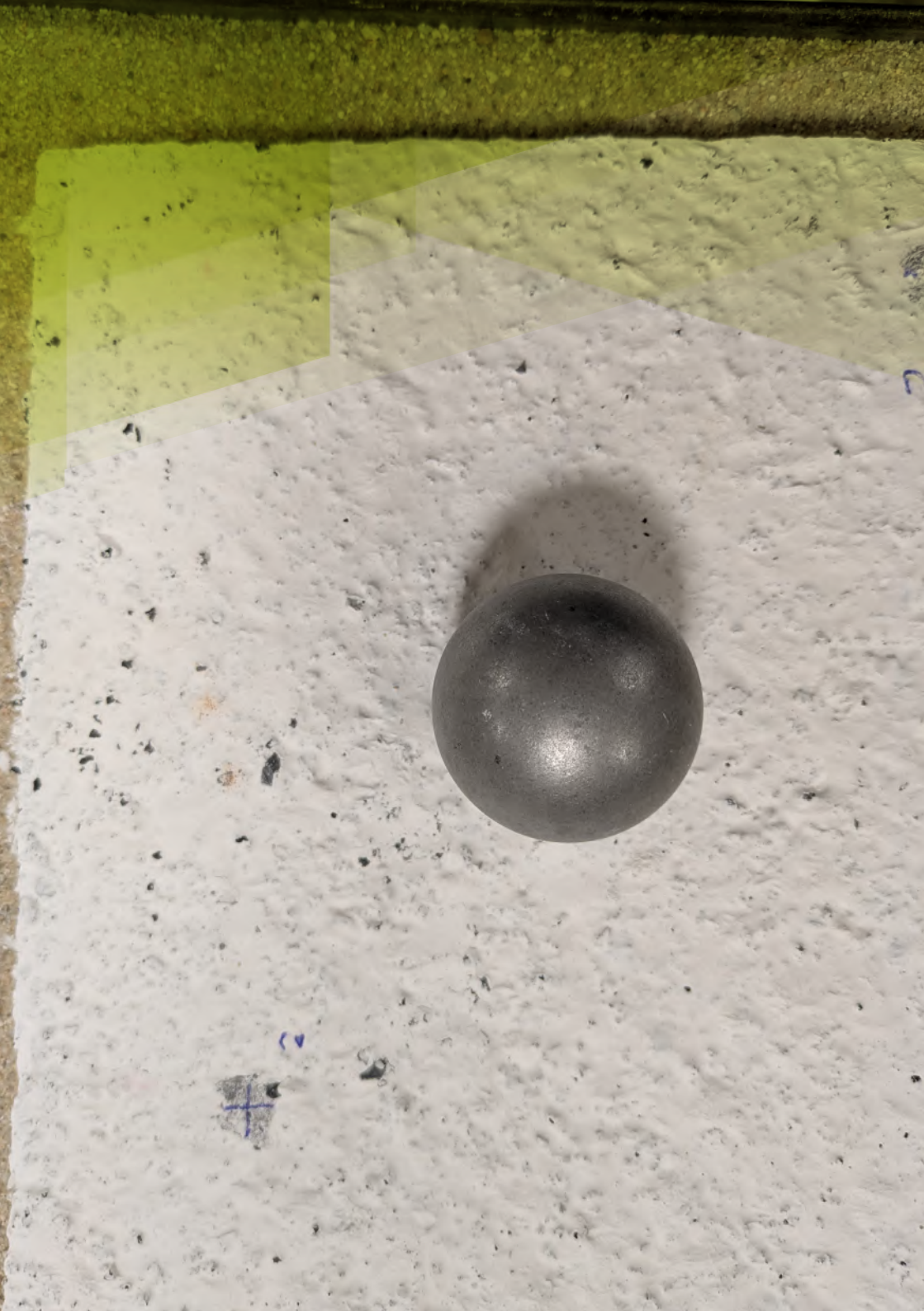


(d)

Figura 4.11. Análisis SEM de la muestra RS3_E0.7-40%M de la Serie 3. Aumentos: (a) *50, (b) *250, (c) *500, (d) *2000.



N°
SERIE
EUROTAMIZ



Análisis del ciclo de vida de compuestos con caucho reciclado

5

Una de las principales ventajas derivadas de la aplicación de los compuestos de escayola con caucho es la disminución del impacto ambiental con respecto a las soluciones tradicionales. Sin embargo, para discutir en profundidad esta afirmación es necesario llevar a cabo un estudio que analice las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del proceso de fabricación de estos materiales. Para ello, se ha seguido la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) ampliamente utilizada en trabajos de investigación [64], estudiando los compuestos con caucho granulado y caucho en polvo de cada una de las tres series elaboradas en el estudio de reciclabilidad (Capítulo 4), y entendiendo que los compuestos con mezcla de granulado y polvo de caucho ofrecerían una solución intermedia entre estas dos (granulado y polvo).

5.1. Unidad funcional y condiciones de contorno

La unidad funcional tomada como referencia para el desarrollo del ACV fue 1 m² de placa o panel de escayola tomando como referencia un espesor comercial de 12,5 mm. Esta unidad declarada sirve como referencia para comparar los impactos de los diferentes compuestos de cada una de las tres series analizadas en esta guía de aplicación. Las condiciones de contorno para este análisis incluyen el impacto ambiental

derivado desde la extracción de materias primas hasta la manufactura y embalaje de estas placas prefabricadas (cradle-to-gate), tal y como se recoge en el esquema presentado en la Figura 5.1.

De esta manera, tal y como se muestra en la Figura 5.1, este análisis recoge los impactos ambientales hasta la obtención del producto final preparado para ser usado en la industria de la construcción. Este tipo de análisis cradle-to-gate son los más comúnmente realizados cuando se aborda el diseño de nuevos productos de construcción [65].

5.2. Análisis del inventario

El análisis de inventario se realiza para cuantificar los inputs (energía y materias primas) y outputs (emisiones y residuos) del proceso de producción de los prefabricados de escayola diseñados en esta investigación. Para ello, se han tenido en cuenta las declaraciones ambientales de producto de las materias primas empleadas, así como los diferentes tipos de energía y combustibles empleados durante el proceso de fabricación de 1 m² de placa o panel prefabricado según se recoge en la bibliografía [4, 66]. Adicionalmente, para el caso de esta investigación se considera que la industria productora de la escayola como materia prima es también la encargada de elaborar las

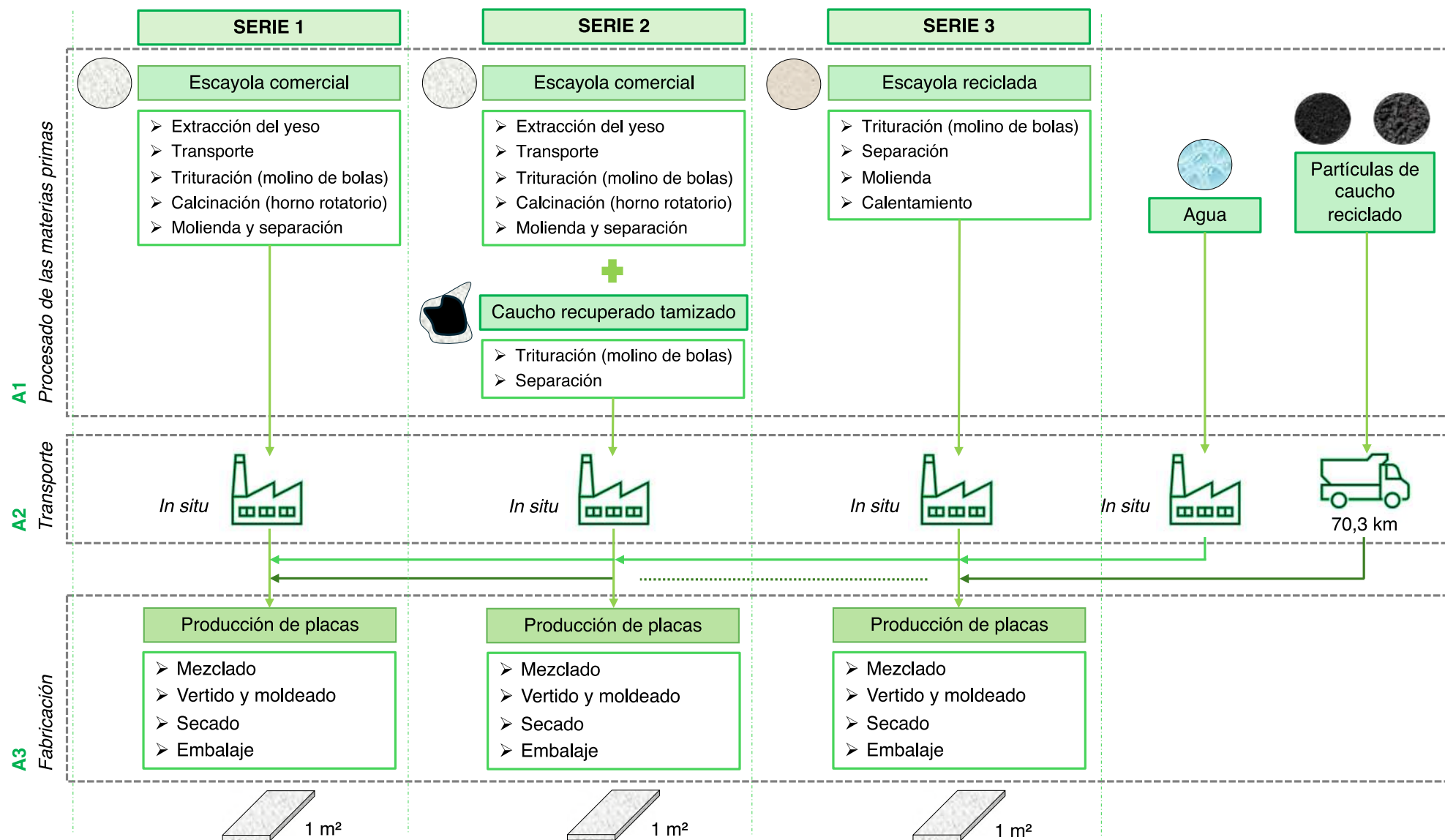


Figura 5.1. Límites del sistema empleados para el ACV de los compuestos estudiados.

placas y paneles prefabricados, así como de reciclar los materiales con base yeso para su reincorporación al proceso productivo dentro de esa misma planta. Estas consideraciones han sido tomadas en cuenta dentro de la etapa A2 relativa al transporte. A su vez, el agua empleada en el amasado es agua corriente con suministro directo en la planta de fabricación y el caucho reciclado se transporta desde una planta de reciclaje que se encuentra situada a una distancia de 70,3 km de la industria manufacturera. Cabe destacar que para el desarrollo de este trabajo se ha considerado que la central de producción se encuentra en la Comunidad de Madrid (España).

Para el caso concreto del agua, se han empleado datos genéricos procedentes de la base de datos para inventario de ciclo de vida de *Ecoinvent report V3*. Asimismo, para los impactos relativos a los combustibles necesarios para la fabricación en planta se tuvo en cuenta el mix energético español. En la Tabla 5.1 se recogen las cantidades y distancias a considerar para la ejecución de 1 m² de panel prefabricado en función del compuesto de yeso analizado dentro de los incluidos en esta investigación.

Como se puede observar, solo se ha analizado el material base que conforma estos prefabricados (escayola más caucho), sin incluir el posible papel Kraft o lámina de caucho aglomerada que permitiría mejorar la resistencia o comportamiento termoacústico, respectivamente. Por su parte, en la Figura 5.2 se recoge el inventario de procesos y consumos de energía considerados para la producción de 1 m² de placa prefabricada, siendo esta la unidad funcional.

Estos datos del inventario fueron convertidos a potenciales impactos medioambientales, empleando los siguientes indicadores: Potencial de calentamiento global (GWP), Agotamiento de la capa de ozono (ODP), Acidificación (AP), Eutrofización (EP), Formación fotoquímica de ozono (POCP) y Agotamiento del recurso energético (ADP_FF).

5.3.Impactos ambientales asociados

La Tabla 5.2 presenta los valores cuantificados para los diferentes impactos ambientales

Denominación			Escayola (t)	Agua (t)	Caucho reciclado de NFVU		
Serie 1	Serie 2	Serie 3			Granulado (t)	Polvo (t)	Transporte (km)
REF	-	-	1,627E-02	1,302E-02	-	-	-
S1-20%G	S2-20%G	S3-20%G	1,302E-02	1,042E-02	6,510E-04	-	70,3
S1-40%G	S2-40%G	S3-40%G	9,766E-03	7,813E-03	1,302E-03	-	70,3
S1-20%P	S2-20%P	S3-20%P	1,302E-02	1,042E-02	-	1,221E-03	70,3
S1-40%P	S2-40%P	S3-40%P	9,766E-03	7,813E-03	-	2,441E-03	70,3

Tabla 5.1. Inventario de materiales e insumos de transporte para 1 m² (espesor 12,5 mm) de prefabricado en cada compuesto.

Serie	GWP (kgCO ₂ eq)	ODP (kgCFC-11eq)	AP (kgSO ₂ eq)	POCP (kgC ₂ H ₄ eq)	EP (kgPO ₄ eq)	ADP_FF (MJ)
REF	5,28E+00	1,50E-07	2,32E-02	1,14E-03	9,97E-03	5,42E+01
S1-20%G	4,56E+00	1,26E-07	1,94E-02	9,64E-04	8,19E-03	6,48E+01
S1-40%G	3,85E+00	1,02E-07	1,56E-02	7,89E-04	6,41E-03	7,55E+01
S1-20%P	4,59E+00	1,26E-07	1,95E-02	9,67E-04	8,20E-03	7,95E+01
S1-40%P	3,89E+00	1,03E-07	1,57E-02	7,96E-04	6,43E-03	1,05E+02
S2-20%G	4,68E+00	1,28E-07	2,00E-02	9,86E-04	8,32E-03	6,81E+01
S2-40%G	3,97E+00	1,04E-07	1,62E-02	8,11E-04	6,53E-03	7,87E+01
S2-20%P	4,17E+00	9,49E-08	1,80E-02	8,82E-04	7,87E-03	5,88E+01
S2-40%P	3,93E+00	8,55E-08	1,57E-02	7,89E-04	6,44E-03	9,50E+01
S3-20%G	2,74E+00	8,04E-08	1,45E-02	6,66E-04	6,97E-03	2,97E+01
S3-40%G	2,08E+00	6,08E-08	1,10E-02	5,04E-04	5,24E-03	4,31E+01
S3-20%P	2,45E+00	6,42E-08	1,35E-02	6,10E-04	6,73E-03	3,13E+01
S3-40%P	2,13E+00	6,15E-08	1,11E-02	5,10E-04	5,26E-03	7,24E+01

Tabla 5.2. Indicadores de impacto ambiental determinados para cada material de escayola.

obtenidos en cada material con base escayola analizado.

Para el caso de las emisiones de CO₂ (GWP), el compuesto de referencia elaborado únicamente con escayola comercial fue el que presentó un mayor impacto medioambiental. Esto es debido a las emisiones asociadas durante el proceso de extracción y preparación del yeso natural [4]. Así, los compuestos de la serie 2 presentan menores emisiones de CO₂ atmosférico, ya que parte de la escayola original es reemplazada por granulado o polvo de caucho recuperado. Sin embargo, la serie 2 presenta un ligero aumento de las emisiones asociadas respecto a la serie 1 como consecuencia del proceso de trituración y tamizado de los compuestos de yeso originales. Finalmente, los compuestos medioambientalmente más amigables fueron los elaborados para la serie 3, poniendo de

manifiesto la bondad derivada de emplear escayola reciclada en el proceso de fabricación de estos composites [67]. Una tendencia similar a la descrita se puede observar en el resto de los indicadores: ODP, AP, POCP y EP, hasta llegar al ADP_FF. Y es que, para este último indicador asociado al consumo de energía no renovable, se observa un incremento en los compuestos con incorporación de granulado o polvo de caucho recuperado asociado a su proceso de obtención a partir de NFVU. Este proceso de trituración, separación y tamizado del caucho penaliza el balance energético final de estos compuestos con respecto a la escayola de referencia, salvo en los compuestos de la serie 3, donde es posible obtener en algunos casos una menor demanda de estos recursos energéticos no renovables como consecuencia del empleo de escayola reciclada en la elaboración de las muestras.

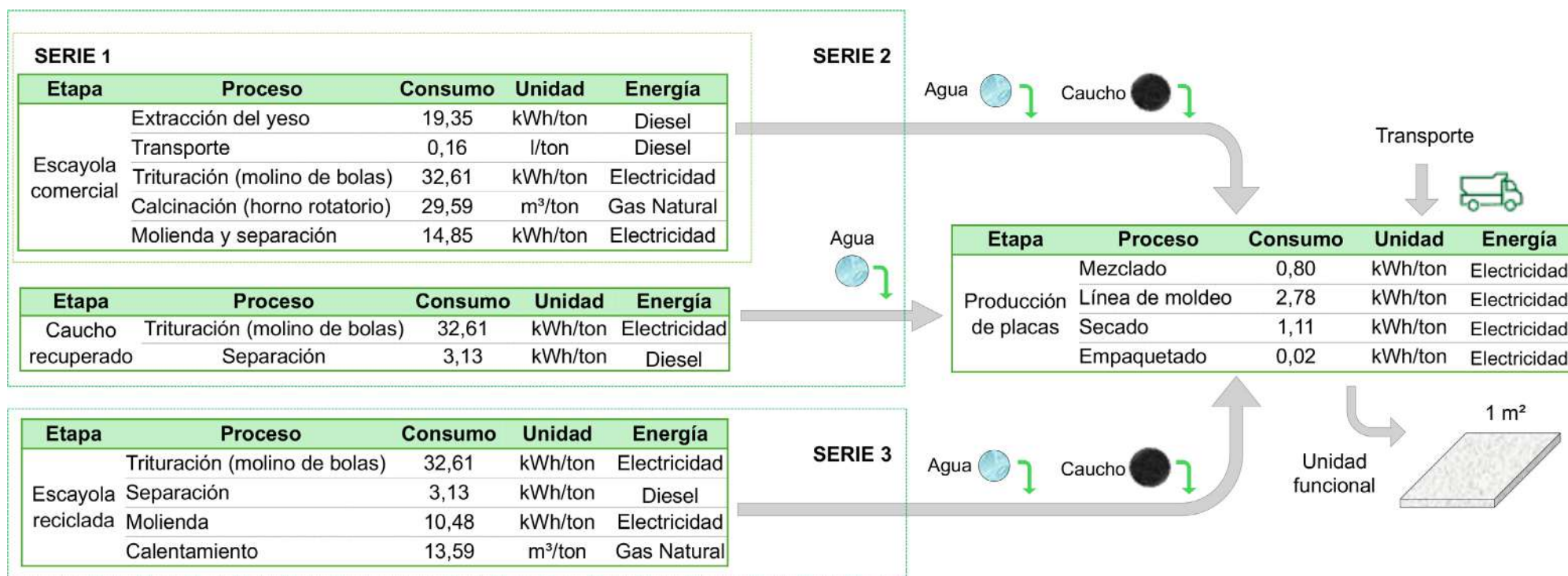


Figura 5.2. Inventario de procesos y energía considerados en la producción de 1 m² de placa de prefabricada.

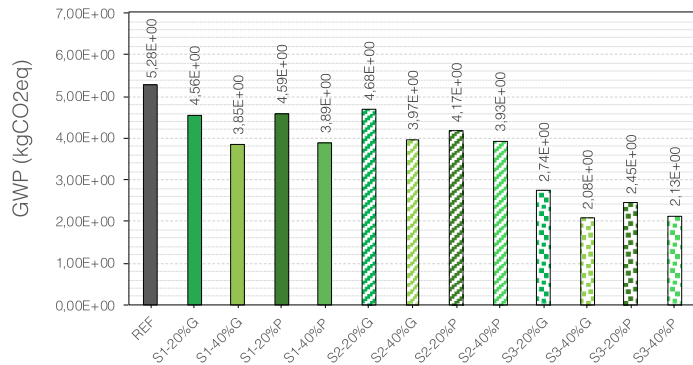


Figura 5.3. Resultados del impacto Potencial de calentamiento global (GWP).

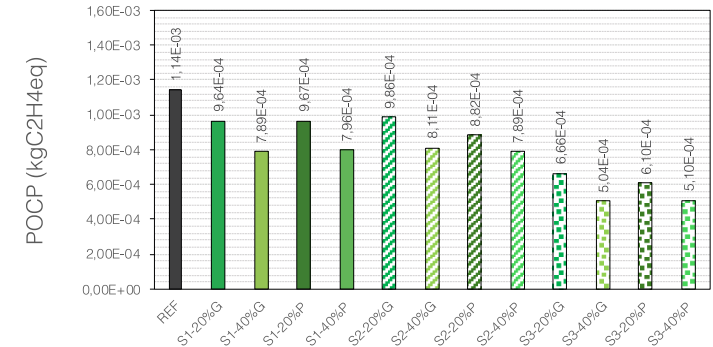


Figura 5.6. Resultados del impacto Formación fotoquímica de ozono (POCP).

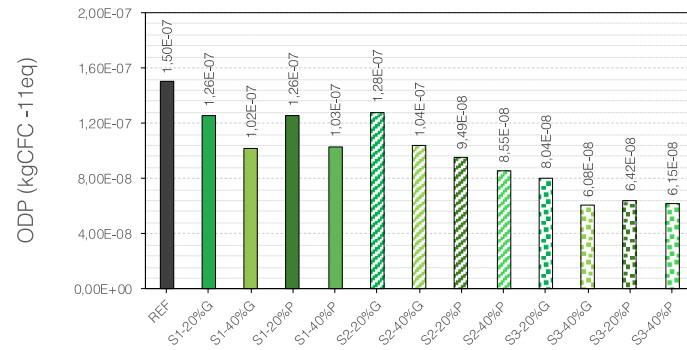


Figura 5.4. Resultados del impacto Agotamiento de la capa de ozono (ODP).

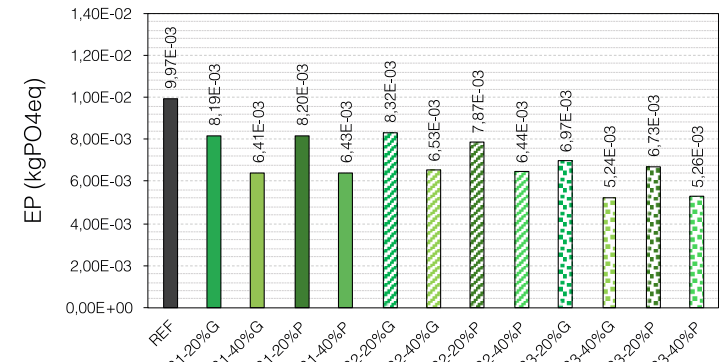


Figura 5.7. Resultados del impacto Eutrofización (EP).

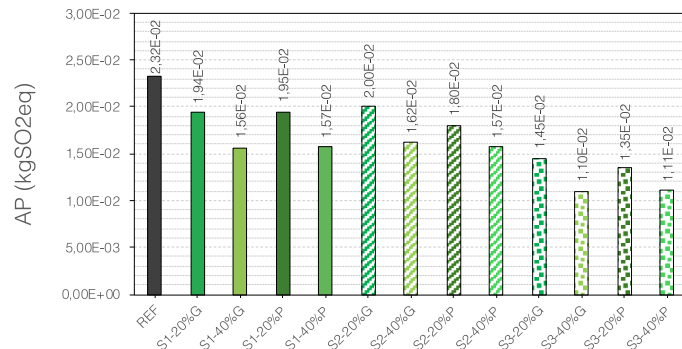


Figura 5.5. Resultados del impacto Acidificación (AP).

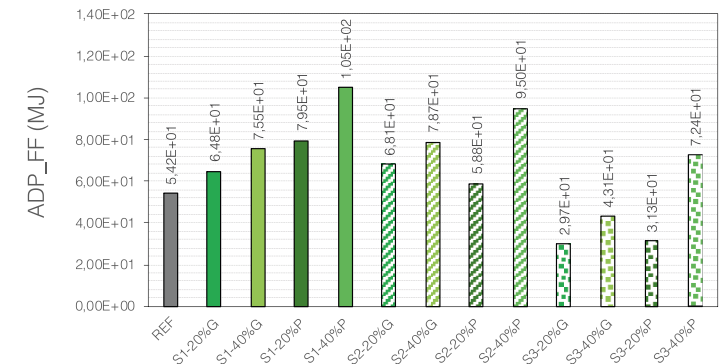
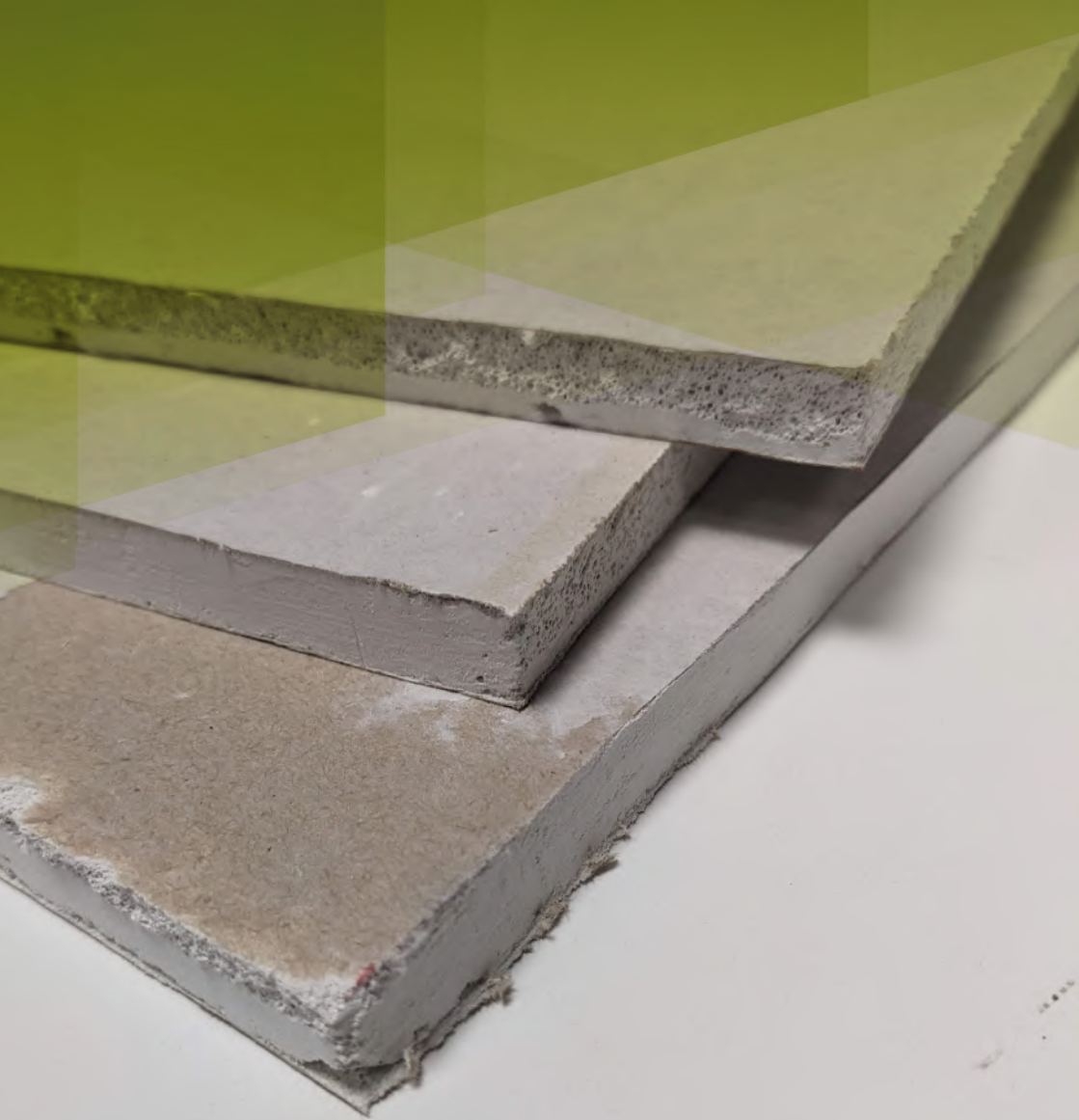


Figura 5.8. Resultados del impacto Agotamiento del recurso energético (ADP_FF).



Aplicaciones

6

En base a los resultados obtenidos para los ensayos en compuestos de escayola, se entiende que estos productos con sustitución parcial de la matriz por caucho reciclado de NFVU son de gran utilidad en trabajos de rehabilitación. En este sentido, estos compuestos pueden ayudar a mejorar la resistencia térmica de los cerramientos, mejorando así la calificación

energética del sistema constructivo original. Una posible aplicación, más allá de la ejecución de falsos techos y particiones interiores, radica en la elaboración de trasdosados interiores debidamente aislados para mejorar el comportamiento térmico de la envolvente del edificio. Una solución constructiva tipo que representa esta idea se muestra en la Figura 6.1.

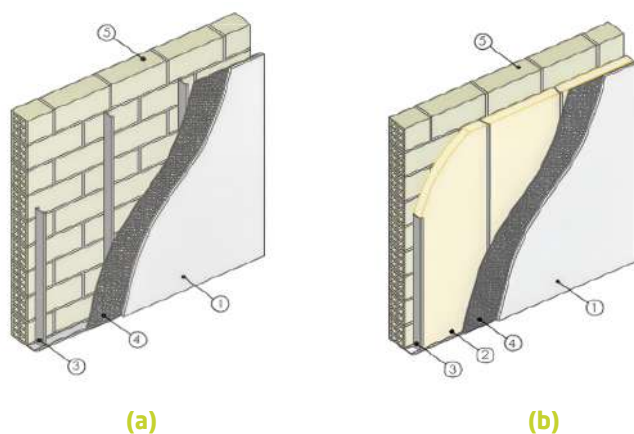


Figura 6.1. Trasdoso de fachada con rotura de puente térmico: (a) sin aislamiento térmico, (b) con aislamiento térmico. (1) placa de escayola, (2) aislamiento térmico, (3) perfilería metálica (4) banda de rotura de puente térmico, (5) muro de fábrica de ladrillo.

En cualquier caso, materiales para la elaboración de prefabricados pueden contribuir hacia la industrialización del sector de la construcción y presentar soluciones constructivas originales diseñadas *off site*. Este proceso tiene la ventaja de que se puede llevar a cabo un control de calidad más exhaustivo de las piezas diseñadas, lo que permite disminuir posibles errores durante el proceso de ejecución [68]. Además, el trabajo con estas “tabiquerías secas” y falsos techos facilita la puesta en obra, reduciendo los tiempos de trabajo y siendo más confortables de ejecutar por parte del operario [69]. Además, favorece la creación de economías de escala, la demanda bajo pedido de piezas de construcción modular y optimiza el proceso de distribución [70], haciendo que la cadena de suministro sea más eficiente. Todo ello, unido a la posibilidad de recuperar, reciclar y revalorizar estos productos al final de su vida útil, hacen de esta solución constructiva una alternativa sostenible para avanzar hacia la integración de criterios de economía circular en el sector de la construcción, tal y como recomienda la normativa actual y queda establecido en el Pacto Verde Europeo [71].

Otra posible aplicación de estos compuestos de escayola sería su utilización en revestimientos estéticos, tales como molduras ornamentales o paneles decorativos en superficies verticales y horizontales. Este aspecto viene potenciado por el característico acabado de estos materiales de escayola con caucho, donde el material reciclado de color negro queda distribuido de manera uniforme a lo largo de la matriz del material base de color blanco, aportando así un aspecto distintivo y original.

Asimismo, este tipo de materiales de construcción también encuentran su aplicación en la reparación de fisuras interiores y en zonas con movimientos diferenciales leves. Esto es debido a la mayor elasticidad que otorga el caucho a los materiales con base yeso reduciendo el riesgo de fisuración por contracción o movimientos leves, lo cual es útil en zonas donde se requiera una mayor absorción de vibraciones.

Finalmente, se destaca que, debido al mejor comportamiento frente a la acción del agua de los compuestos de escayola con caucho frente a



los materiales tradicionales, un posible campo de aplicación sería su empleo en cuartos húmedos. Así, su menor absorción de agua por capilaridad reduce el riesgo de generación de humedades en zonas que puedan verse sometidas a posibles salpicaduras.

También se puede destacar que la buena resistencia al impacto obtenida en los materiales

con incorporación de caucho, amplía el campo de aplicación de estos prefabricados a zonas donde exista un mayor tránsito de personas, tales como pasillos de centros educativos o centros comerciales. Este efecto, unido al mejor comportamiento térmico y acústico de estos compuestos de escayola, potencia aún más su aplicación como trasdosados de interior.

APLICACIÓN DEL CAUCHO RECICLADO DE NFVU EN EDIFICACIÓN
• Tabiquerías secas.
• Falsos techos.
• Trasdosados interiores de fachada con rotura de puente térmico.
• Revestimientos estéticos (molduras ornamentales o paneles decorativos en superficies verticales y horizontales).
• Reparación de fisuras interiores y en zonas con movimientos diferenciales leves.
• Empleo en cuartos húmedos.
• Aplicación en zonas de mayor tránsito de personas, tales como pasillos de centros educativos o centros comerciales.





ibertest

Conclusiones



Este documento se presenta como una **herramienta de trabajo destinada a especialistas del sector de la edificación** donde se han recogido todos los aspectos a tener en cuenta en el uso de caucho reciclado procedente de neumáticos en soluciones constructivas de compuestos de escayola para diversas aplicaciones.

Además, gracias al análisis presentado se ha podido demostrar que el **caucho reciclado procedente de NFVU** es una materia prima secundaria apta para la fabricación de soluciones constructivas sostenibles de compuestos de escayola. Por todo ello, de manera general, podemos concluir que:

1. Se ha analizado la resistencia a flexión en tres tipos de paneles prefabricados diseñados para esta investigación: sin refuerzo, con refuerzo de papel Kraft y con lámina de corcho-caucho. Aunque en todos se aprecia la buena integración del caucho reciclado en la matriz de escayola, las mayores resistencias a flexión se alcanzaron en los paneles de la serie reforzada con papel Kraft, superando en más de un 30 % la resistencia de los compuestos sin reforzar. El único compuesto de yeso que no alcanzó el valor mínimo de carga de rotura establecido por la normativa UNE-EN 12859 (0.18 kN) fue el E0.7-40%P en los prefabricados sin refuerzo y con rotura de puente térmico.
2. Los compuestos con reemplazo del material de escayola por caucho reciclado en proporción del 40 % presentaron en media una reducción de la conductividad térmica del 20 % respecto al material de referencia (E0.7). Esto supone un avance para el desarrollo de prefabricados que permitan mejorar la eficiencia energética de los sistemas constructivos, tal y como se pudo apreciar en la simulación realizada, donde una partición elaborada con el compuesto E0.7-40%M y rotura de puente térmico presentaba una resistencia térmica un 21,8 % superior a la partición convencional (panel de escayola sin caucho y sin rotura de puente térmico).
3. Asimismo, al incorporar caucho reciclado de NFVU se mejoran considerablemente las propiedades de los compuestos de escayola frente a la acción del agua. Así, para el caso de los compuestos tipo E0.7-40%M se redujo la absorción de agua por capilaridad hasta en un 49,2 % respecto a la referencia. Estos resultados fueron acompañados de una reducción en la absorción total de agua y porosidad abierta, coeficientes que se vieron reducidos conforme se aumentaba el contenido de caucho en la matriz.
4. Los ensayos de reacción frente al fuego han permitido predecir una clasificación B-s1, d0 de acuerdo con el sistema de Euroclases, tras lo cual, se puede afirmar que los compuestos

elaborados en esta investigación son aptos para la elaboración de placas y paneles prefabricados de escayola.

5. Finalmente, se ha explorado el potencial de reciclabilidad de estos compuestos de escayola con caucho reciclado, donde se ha podido comprobar el cumplimiento de las resistencias mecánicas exigidas por la norma UNE-EN 13279-2 a flexión

y compresión para los compuestos elaborados en cada serie. Estos resultados permiten avanzar hacia una mayor circularidad de los productos de construcción en línea con los requisitos del Pacto Verde Europeo.

Como futura línea de trabajo se identifica el desafío de integrar de manera efectiva estos compuestos de escayola y caucho en



la construcción. Para ello, es necesario trabajar de la mano de arquitectos y diseñadores interesados en aplicar estos materiales elaborados con materias primas recicladas, poniendo de manifiesto su viabilidad técnica y beneficios medioambientales. Por otro lado, resulta fundamental estudiar estrategias de concienciación y comunicación que fomenten la aceptación social y profesional de estos

materiales, superando prejuicios sobre su calidad, durabilidad o estética. Así, aunque aún queda mucho camino por recorrer, la elaboración de informes técnicos que evidencien las posibilidades de uso de estos innovadores materiales permitirá a los técnicos y profesionales del sector de la edificación tener una visión más clara sobre su aplicabilidad y ventajas.





Referencias bibliográficas



- [1] Erbs, A.; Nagalli, A.; Querne de Carvalho, K.; Mymrin, V.; Hermes Passig, F.; Mazer, W. (2018). Properties of recycled gypsum from gypsum plasterboards and commercial gypsum throughout recycling cycles. *Journal of Cleaner Production* 183, 1314-1322, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.189>
- [2] Zaragoza-Benzal, A.; Ferrández, D.; Santos, P.; Atanes-Sánchez, E. (2024). Development and characterization of new lightweight waste-based plaster composites for building applications. *Journal of Building Engineering*, 96, 110525, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110525>
- [3] Erbs, A.; Nagalli, A.; Carvalho, K.Q.; Mymrin, V.; Hermes Passing, F.; Mazer, W. (2018). Properties of recycled gypsum from gypsum plasterboards and commercial gypsum throughout recycling cycles. *Journal of Cleaner Production*, 183, 1314-1322, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.189>
- [4] Pedreño-Rojas, M.A.; Fořt, J.; Černý, R.; Rubio-de-Hita, P. (2020). Life cycle assessment of natural and recycled gypsum production in the Spanish context. *Journal of Cleaner Production*, 253, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120056>
- [5] Statista: Evolución anual de la producción de yeso en España de 2011 a 2021. (2024). Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/823193/produccion-de-yeso-en-espana/> (último acceso 27 de agosto 2024).
- [6] Pedreño-Rojas, M.A.; Flores-Colen, I.; de Brito, J.; Rodríguez-Liñán, C. (2019). Influence of the heating process on the use of gypsum wastes in plasters: Mechanical, thermal and environmental analysis. *Journal of Cleaner Production*, 215, 444-457, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.053>

- [7] del Río-Merino, M.; Vidales-Barriguet, A.; Piña-Ramírez, C.; Vitiello, V.; Santa Cruz-Astorqui, J.; Castellucio, R. (2022). A review of the research about gypsum mortars with waste aggregates. *Journal of Building Engineering* 45, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103338>
- [8] del Río-Merino, M.; Vidales-Barriguet, A.; Piña-Ramírez, C.; Vitiello, V.; Santa Cruz-Astorqui, J.; Castellucio, R. (2022). A review of the research about gypsum mortars with waste aggregates. *Journal of Building Engineering*, 45, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103338>
- [9] López-Záldívar, O.; Lozano-Díez, R.; Herrero del Cura, S.; Mayor-Lobo, P.; Hernández-Olivares, F. (2017). Effects of water absorption on the microstructure of plaster with end-of-life tire rubber mortars. *Construction and Building Materials*, 150, 558-567, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.014>
- [10] Herrero, S.; Mayor, P.; Hernández-Olivares, F. (2013). Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars. *Materials & Design*, 47, 633-642, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.063>
- [11] Bhowmick, A.K.; Hall, M.M.; Benarey, H.A. (1994). "Rubber Products Manufacturing Technology". Marcel Dekker, Inc, New York, ISBN 0-8247-9112-6
- [12] Lechtenboehmer, A.; Moneypenny, H.G.; Mersch, F. (1990). A Review of Polymer Interfaces in Tyre Technology. *British Polymer Journal*, 22 (4), 265-301, <https://doi.org/10.1002/pi.4980220402>
- [13] Lindemuth, B. E. (2006). Chapter 1: An Overview of Tire Technology in "Pneumatic Tire". Ed. Gent, A.N.; Walter, J.D. U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration.
- [14] López Valentín, J.; Saiz Rodríguez, L.; Pérez Aparicio, R. (2022). Guía para el empleo de caucho reciclado procedente del neumático en la industria del caucho. ISBN 978-84-09-38496-9, Depósito legal M-6799-2022, https://www.signuses/wp-content/uploads/2022/05/Guia_polvo_de_neumatico_sector_caucho_2022.pdf
- [15] Vidales-Barriguet, A.; Santa-Cruz-Astorqui, J.; Piña-Ramírez, C.; Kosior-Kazberuk, M.; Kalinowska-Wichrowska, K. & Atanes-Sánchez, E. (2021). Study of the Mechanical and Physical Behavior of Gypsum Boards with Plastic Cable Waste Aggregates and Their Application to Construction Panels. *Materials* 14, no. 9: 2255. <https://doi.org/10.3390/ma14092255>
- [16] Zaragoza-Benzal, A.; Ferrández, D.; Atanes-Sánchez, E.; Saiz, P. (2023). Dissolved recycled expanded polystyrene as partial replacement in plaster composites. *Journal of Building Engineering* 65, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105697>
- [17] Escayola comercial tipo Iberyola E35. Último acceso web 26 de junio de 2024: <https://www.placo.es/Producto/iberyolar#documents>

- [18] Canal de Isabel II. Calidad del agua. Disponible en: <https://www.canaldeisabelsegunda.es/calidad-del-agua> (último acceso 26 de junio de 2024).
- [19] Agico Cement (2024). Disponible en: <https://cementplants.es/applications/gypsum-board-production-line/> (último acceso 22 julio 2024).
- [20] Iucolano, F.; Liguori, B.; Aprea, P.; Caputo, D. (2018). Evaluation of bio-degummed hemp fibers as reinforcement in gypsum plaster. *Composites Part B: Engineering*, 138, 149-156, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.037>
- [21] Ferrández, D.; Álvarez, M.; Zaragoza-Benzal, A.; Cobo-González, Á.; Santos, P. (2024). Development and Characterization of Innovative Hemp-Gypsum Composites for Application in the Building Industry. *Applied Sciences*, 14, 2229. <https://doi.org/10.3390/app14062229>
- [22] Amorim Cork. (2024). Disponible en: <https://www.amorimcork.com/es/> (último acceso 22 julio 2024).
- [23] Li, Z.; Wang, X.; Wijeyewickrema, A.C.; Wu, Z. (2024). Flexural performance enhancement of modified gypsum-based composite boards using basalt fiber braids. *Construction and Building Materials*, 418, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135430>
- [24] Pedreño-Rojas, M.A.; de Brito, J.; Flores-Colen, I.; Pereira, M.F.C.; Rubio-de-Hita, P. (2020). Influence of gypsum wastes on the workability of plasters: Heating process and microstructural analysis. *Journal of Building Engineering*, 29, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101143>
- [25] Yang, Y.; Shen, Z.; Weidong, W.; Zhang, H.; Ren, Y.; Yang, Q. (2022). Preparation of a novel diatomite-based PCM gypsum board for temperature-humidity control of buildings. *Building and Environment*, 226, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109732>
- [26] Romero-Gómez, M.I.; Silva, R.V.; Flores-Colen, I.; de Brito, J. (2022). Influence of polypropylene residues on the physico-mechanical and water-resistance properties of gypsum plasters. *Journal of Cleaner Production*, 371, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133674>
- [27] Doleželová, M.; Krejslová, J.; Scheinherrová, L.; Keppert, M.; Vimrová, A. (2022). Investigation of environmentally friendly gypsum based composites with improved water resistance. *Journal of Cleaner Production*, 370, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133278>
- [28] Santos, P.; Mateus, D.; Ferrandez, D.; Verdu, A. (2022). Numerical Simulation and Experimental Validation of Thermal Break Strips' Improvement in Facade LSF Walls. *Energies*, 15, 8169, <https://doi.org/10.3390/en15218169>
- [29] Santos, P.; Abrantes, D.; Lopes, P.; Moga, L. (2024). The Relevance of Surface Resistances on the Conductive Thermal Resistance of Lightweight Steel-Framed Walls: A Numerical Simulation Study. *Applied Sciences*, 14, 3748, <https://doi.org/10.3390/app14093748>

- [30] Vidales-Barrigüete, A.; Piña-Ramírez, C.; Serrano-Somolinos, R.; Río-Merino, M.; Atanes-Sánchez, E. (2021). Behavior resulting from fire in plasterboard with plastic cable waste aggregates. *Journal of Building Engineering*, 40, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102293>
- [31] Lanzón, M.; Castellón, F.J.; Ayala, M. (2022). Effect of the expanded perlite dose on the fire performance of gypsum plasters. *Construction and Building Materials*, 346, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128494>
- [32] Castellón, F.; Ayala, M.; Lanzón, M. (2022). Influence of tire rubber waste on the fire behavior of gypsum coatings of construction and structural elements. *Materiales De Construcción*, 72(345), e275, <https://doi.org/10.3989/mc.2022.06421>
- [33] Predreño-Rojas, M.; Fort, J.; Cerny, R.; Rubio de Hita, P. (2020). Life cycle assessment of natural and recycled gypsum production in the Spanish context. *Journal of Cleaner Production*, 253, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120056>
- [34] Patterson, A.L. "The Scherrer Formula for I-Ray Particle Size Determination," 1939.
- [35] Erbs, A.; Nagalli, A.; Carvalho, K.; Mazer, W.; Moraes Erbs, M.; Paz, D.H.F.; Lafayette, K.P.V. (2021). Development of plasterboard sheets exclusively from waste. *Journal of Building Engineering*, 44, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102524>
- [36] Zhou, J.; Li, X.; Zhao, Y.; Shu, Z.; Wang, Y.; Zhang, Y.; Shen, X. (2020). Preparation of paper-free and fiber-free plasterboard with high strength using phosphogypsum. *Construction and Building Materials*, 243, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118091>
- [37] Ferrández, D.; Álvarez, M.; Zaragoza-Benzal, A.; Santos, P. (2024). Eco-Design and Characterization of Sustainable Lightweight Gypsum Composites for Panel Manufacturing including End-of-Life Tyre Wastes. *Materials*, 17, 635, <https://doi.org/10.3390/ma17030635>
- [38] Pedreño-Rojas, M.A.; Porras-Amores, C.; Villoria-Saez, P.; Morales-Conde, M.J.; Flores-Colen, I. (2024). Characterization and performance of building composites made from gypsum and woody-biomass ash waste: A product development and application study. *Construction and Building Materials*, 419, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135435>
- [39] Asadi Ardebili, A.; Villoria Sáez, P.; González Cortina, M.; Tasán Cruz, D.M.; Rodríguez Saiz, Á.; Atanes-Sánchez, E. (2023). Mechanical characterization of gypsum mortars with waste from the automotive sector. *Construction and Building Materials*, 370, 130675, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130675>
- [40] Jiménez-Rivero, A.; Guzmán Báez, A.; García Navarro, J. (2014). New composite gypsum plaster – ground waste rubber coming from pipe foam insulation. *Construction and Building Materials*, 55, 146-152, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.027>

- [41] Álvarez, M.; Ferrández, D.; Morón, C.; Atanes-Sánchez, E. (2024). Super absorbent polymers (SAP) in building materials: Application opportunities through physico-chemical and mechanical analysis. *Construction and Building Materials*, 435, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136904>
- [42] Zhou, H.; Rao Puttige, A.; Nair, G.; Olofsson, T. (2024). Thermal behaviour of a gypsum board incorporated with phase change materials. *Journal of Building Engineering*, 94, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109928>
- [43] Suh, W.D.; Yuk, H.; Choi, J.Y.; Nam, J.; Kim, S. (2024). Enhancing thermal performance of gypsum with luffa fiber-based phase change materials for application in advanced indoor finishing material. *Construction and Building Materials*, 428, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136248>
- [44] Pedreño-Rojas, M.A.; Villoria-Saez, P.; Porras-Amores, C.; Morales-Conde, M.J.; Flores-Colen, I. (2024). Reuse of wood biomass ash to improve thermal behavior of gypsum plasters. *Procedia Structural Integrity*, 55, 103-109, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.02.014>
- [45] Vidales-Barriguete, A.; Barreira, E.; Gomes Dias, S. (2024). Assessment of the Thermal Properties of Gypsum Plaster with Plastic Waste Aggregates. *Materials*, 17, <https://doi.org/10.3390/ma17071663>
- [46] Santos, P.; Lopes, P.; Abrantes, D. (2023). Thermal Performance of Lightweight Steel Framed Facade Walls Using Thermal Break Strips and ETICS: A Parametric Study. *Energies*, 16, <https://doi.org/10.3390/en16041699>
- [47] Santos, P.; Abrantes, D.; Lopes, P.; Mateus, D. (2022). Experimental and Numerical Performance Evaluation of Bio-Based and Recycled Thermal Break Strips in LSF Partition Walls. *Buildings*, 12, 1237, <https://doi.org/10.3390/buildings12081237>
- [48] Wu, Q.; Ma, H.; Chen, Q.; Gu, B.; Li, S.; Zhu, H. (2019). Effect of silane modified styrene-acrylic emulsion on the waterproof properties of flue gas desulfurization gypsum. *Construction and Building Materials*, 197, 506-512, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.185>
- [49] Chen, C.; Ma, F.; He, T.; Kang, Z.; Wang, Y.; Shi, C. (2022). Improved water and efflorescence resistance of flue gas desulfurization gypsum-based composites by generating hydrophobic coatings. *Journal of Cleaner Production*, 371, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133711>
- [50] Li, J.; Ma, B.; Zhang, X.; Lu, X. (2024). Enhancement and mechanism of macro-defect free (MDF) gypsum water resistance achieved by hydrophobic modification. *Case Studies in Construction Materials*, 20, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02791>
- [51] Wang, L.; Cao, M.; Li, X.; Du, W.; Wang, X. (2023). A novel approach for improving the water resistance of gypsum plaster by internal mixing hypromellose and external coating waterproofing agent. *Construction and Building Materials*, 401, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132940>

- [52] Ferrández, D.; Zaragoza-Benzal, A.; Santos, P.; Durães, L. (2023). Characterisation of new sustainable gypsum composites with low-density polyethylene waste from single-use bags. *Journal of Building Engineering*, 80, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108103>
- [53] Vidales, A.; Atanes-Sánchez, E.; del Río, M.; Piñá, C. (2020). Analysis of the improved water-resistant properties of plaster compounds with the addition of plastic waste. *Construction and Building Materials*, 230, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116956>
- [54] Decoplack. (2024). Disponible en: <https://www.decoplack.com/nueva-placo-planet/> (último acceso 1 octubre 2024).
- [55] Ahmed, A.; Ugai, K.; Kamei, T. (2011). Investigation of recycled gypsum in conjunction with waste plastic trays for ground improvement. *Construction and Building Materials*, 25(1), 208-217, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.036>
- [56] Jin, Z.; Cui, C.; Xu, Z.; Lu, W.; Su, Y.; He, X.; Chen, S.; Li, W.; Wang, B. (2023). Recycling of waste gypsum from α -hemihydrate phosphogypsum: Based on the atmospheric hydrothermal process. *Construction and Building Materials*, 377, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131136>
- [57] Caro, D.; Lodato, C.; Damgaard, A.; Cristóbal, J.; Foster, G.; Flachenecker, F.; Tonini, D. (2024). Environmental and socio-economic effects of construction and demolition waste recycling in the European Unión. *Science of the total environment*, 908, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168295>
- [58] Jiménez Rivero, A.; Sathre, R.; García Navarro, J. (2016). Life cycle energy and material flow implications of gypsum plasterboard recycling in the European Unión. *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 171-181, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.01.014>
- [59] Cao, W.; Yi, W.; Peng, J.; Li, J.; Yin, S. (2022). Recycling of phosphogypsum to prepare gypsum plaster: Effect of calcination temperature. *Journal of Building Engineering*, 45, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103511>
- [60] Romero-Gómez, M.I.; Costa-Pereira, M.F.; Soares Dias, A.P.; Flores-Colen, I. (2023). Influence of high-temperature exposure on the properties of gypsum-plastic waste composites: Thermophysical and microstructural analysis. *Journal of Building Engineering*, 79, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107862>
- [61] Rodríguez-Orejón, A.; del Río-Merino, M.; Fernández-Martínez, F. (2014). Characterization mixtures of thick gypsum with addition of treated waste from laminated plasterboards. *Materiales de construcción*, vol. 64 (314), <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.03413>
- [62] Álvarez, M.; Ferrández, D.; Morón, C.; Atanes-Sánchez, E. (2021). Characterization of a New Lightened Gypsum-Based Material Reinforced with Fibers. *Materials*, 14, 1203, <https://doi.org/10.3390/ma14051203>

- [63] Martínez-Gordón, A.; Prieto-Barrio, M.I.; Cobo Escamilla, A.; Leal Matilla, A. (2024). From waste to resource: Exploring the recyclability and performance of gypsum-graphene nanofiber composites. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 23, <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2024.200222>
- [64] Feng, H.; Zhao, J.; Holberg, A.; Habert, G. (2023). Where to focus? Developing a LCA impact category selection tool for manufacturers of building materials. *Journal of Cleaner Production*, 405, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136936>
- [65] Teixeira, E.R.; Mateus, R.; Camões, A.; Branco, F.G. (2019). Quality and durability properties and life-cycle assessment of high-volume biomass fly ash mortar. *Construction and Building Materials*, 197, 195-207, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.173>
- [66] Romero-Gómez, M.I.; Silva, R.V.; de Brito, J.; Flores-Colen, I. (2023). Prototype of alveolar gypsum blocks with plastic waste addition for partition walls: Physico-mechanical, water-resistance and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 432, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139810>
- [67] Ferrández, D.; Zaragoza-Benzal, A.; Barrak, E.; Santos, P.; Rodrigues, C. (2024). Upcycling expanded polyethylene waste for novel composite materials: Physico-mechanical, hygrothermal and life cycle assessment. *Results in Engineering*, 24, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103535>
- [68] Garthner, M.A.; Grenzfurtnner, W.; Zauner, B.; Gronlat, M. (2024). Job and product rotation for maximising the production output on multi mixed-model assembly lines for element pre-fabrication in industrialised housebuilding. *Computers and Industrial Engineering*, 190, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110041>
- [69] Álvarez, M.; Santos, P.; Lopes, P.; Abrantes, D.; Ferrández, D. (2022). Performance Characterisation of a New Plaster Composite Lightened with End-of-Life Tyres' Recycled Materials for False Ceiling Plates. *Materials*, 15, 5660, <https://doi.org/10.3390/ma15165660>
- [70] Zaragoza-Benzal, A.; Ferrández, D.; Diaz-Velilla, J.P.; Zúñiga-Vicente, J.A. (2023). Manufacture and characterisation of a new lightweight plaster for application in wet rooms under circular economy criteria. *Case Studies in Construction Materials*, 19, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02380>
- [71] Sikkema, R.; Styles, D.; Jonsson, R.; Tobin, B.; Byrne, K.A. (2022). A market inventory of construction wood for residential building in Europe – in the light of the Green Deal and new circular economy ambitions. *Sustainable Cities and Society*, 90, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104370>



Normas de referencia



- UNE-EN 14243-1. Materiales producidos a partir de neumáticos al final de su vida útil. Parte 1: Definiciones generales relativas a los métodos para la determinación de sus dimensiones e impurezas.
- UNE-EN 14243-2. Materiales producidos a partir de neumáticos al final de su vida útil. Parte 2: Granulado y polvo. Métodos para la determinación de sus dimensiones e impurezas, incluyendo contenido de acero libre y textil libre.
- UNE 53936:2015 EX. Materiales de neumáticos fuera de uso. Granulado de caucho. Determinación del contenido de fibra textil mediante el índice visual.
- CEN/TS 16916. Materiales obtenidos a partir de neumáticos al final de su vida útil. Determinación de los requerimientos específicos para el muestreo y la determinación del contenido de humedad mediante el método del secado en horno.
- UNE-EN 13279-1:2009. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones.
- UNE-EN 13279-2:2014. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.
- UNE-EN 12859:2012. Paneles de yeso. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.
- UNE-EN 1925:1999. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad.
- UNE-EN 520:2005. Placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.
- UNE-EN 1936:2007. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.

- UNE-EN 14617-1:2013. Piedra aglomerada. Métodos de ensayo. Parte 1: Determinación de la densidad aparente y la absorción de agua.
- UNE-EN 933-1:2012. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.
- UNE 102042:2014. Yesos y escayolas de construcción. Otros métodos de ensayo.
- UNE-EN 12664:2002. Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor del flujo de calor. Productos secos y húmedos de baja y media resistencia térmica.
- ISO 5660-1:2015. Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate – Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement).
- UNE-EN 13823:2021+A1:2023. 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.
- Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Ahorro de Energía (CTE DB-HE) 2022: <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>
- Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio (CTE DB-SI) 2022: <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/SeguridadEnCasoDelIncendio.html>

