



Received: 12/09/2023

Accepted: 25/11/2023

Anales de Edificación

Vol. 9, Nº2, 31-42 (2023)

ISSN: 2444-1309

DOI: 10.20868/ade.2023.5366

## Rediseño del proceso de fabricación de placas para falso techo de escayola. Estudio de su viabilidad técnica, económica y medioambiental

## Redesign of the manufacturing process for plaster tiles for suspended ceilings. Study of its technical, economic and environmental feasibility

Daniel Ferrández <sup>a</sup>; Alicia Zaragoza-Benzal <sup>a</sup>; Jorge Pablo Diaz-Velilla <sup>a</sup> & Alberto Morón Barrios <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Tecnología de la Edificación, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Juan de Herrera, 6, 28040, Madrid, España: daniel.fvega@upm.es; alicia.zaragoza@upm.es; jorge.diaz.velilla@upm.es; alberto.moron@upm.es

---

**Resumen--** Hoy en día el sector de la construcción se enfrenta a un gran desafío, la creciente conciencia ambiental de un mercado más informado que manifiesta el deseo de que se representen modelos de negocio medioambientalmente más sostenibles. En este trabajo, se aborda el diseño y caracterización de un novedoso panel prefabricado de escayola elaborado bajo criterios de economía circular. Para ello, se han empleado residuos de neumáticos fuera de uso (NFU) de diámetro comprendido entre 2-4 mm, que han servido como sustitución parcial en volumen del material de escayola original. De esta manera, se consigue aligerar el peso de las placas prefabricadas manteniendo un nivel óptimo para las resistencias mecánicas de estos compuestos. Adicionalmente, se ha analizado el proceso de fabricación de estos compuestos, las oportunidades de negocio para estos paneles y se ha realizado un estudio de la cadena de suministro de los mismos. Con ello, se ponen de manifiesto los beneficios tanto económicos, como medioambientales, derivados de la integración de criterios de economía circular en el diseño de los materiales de construcción tradicionales. Así, con este trabajo se contribuye a visualizar la necesidad de explorar nuevas alternativas para avanzar hacia un crecimiento económico responsable en el sector de la construcción.

**Palabras clave—** Neumáticos Fuera de Uso (NFU); cadena de suministro, prefabricación; sostenibilidad; simulación.

---

**Abstract—** Nowadays, the construction sector is facing a great challenge, the growing environmental awareness of a more informed market that expresses the desire to represent more environmentally sustainable business models. In this work, the design and characterization of a novel prefabricated plaster panel produced under circular economy criteria is addressed. For this purpose, waste end-of-life tires (ELT) with a diameter of 2-4 mm have been used, which have served as a partial replacement in volume of the original plaster material. In this way, it is possible to lighten the weight of the prefabricated slabs while maintaining an optimum level for the mechanical resistance of these composites. In addition, the manufacturing process of these composites, the business opportunities for these panels and a study of their supply chain have been analyzed. This highlights the economic and environmental benefits derived from the integration of circular economy criteria in the design of traditional construction materials. Thus, this work contributes to visualizing the need to explore new alternatives to advance towards responsible economic growth in the construction sector.

**Index Terms—** End-of-life tyres (ELTs); supply chain, prefabrication; sustainability; simulation; simulation.

---

## I. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad en la construcción no solo se ha convertido en una responsabilidad ética, sino también en una estrategia clave para la continuidad y la competitividad de las empresas constructoras en el medio-largo plazo. Y es que, el agotamiento de los recursos naturales, la generación desmesurada de residuos por parte de esta industria y las grandes emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a las prácticas constructivas convencionales, plantean una amenaza para las empresas del sector que no sepan redirigir sus modelos de negocio hacia una construcción más sostenible (Cortes *et al.*, 2023).

En términos generales, se puede decir que el sector de la construcción es responsable de cerca del 35% del total de residuos sólidos generados y consume cerca del 39% del total de recursos energéticos (Caro *et al.*, 2024). En este sentido, la UE ha impulsado una iniciativa pionera para impulsar el cambio en los tradicionales métodos de economía lineal a través de la promulgación del Pacto Verde Europeo en 2019, que apuesta por una mayor circularidad de los productos de construcción y una gestión más eficiente de los recursos en esta industria (Moschen-Schimek *et al.*, 2023).

Como es sabido, el ahorro de materias primas puede suponer una fuente potencial de ventaja competitiva en costes para las empresas constructoras. Aproximadamente el 93% de las pequeñas y medianas empresas (PYMES) del sector industrial sufren incrementos en sus costes de producción en España como consecuencia de la inflación (Forbes, 2024). Aunque estas PYMES del sector industrial supongan solo el 6% del tejido empresarial de la nación, contribuyen con cerca del 16% de total de PIB nacional, por lo que cualquier disminución en el consumo de recursos naturales resulta beneficioso a la hora de lanzar productos más competitivos en el mercado.

Otro factor clave para mejorar la competitividad en el mercado consiste en llevar a cabo una gestión eficiente de la cadena de suministro (Arshad & Zayed, 2022). De esta manera, el empleo de simulaciones para conocer el nivel óptimo de inventario a mantener en los almacenes puede suponer una fuente de beneficio para las empresas constructoras. Esto es debido, a la naturaleza voluminosa de los productos de construcción, que ocupan grandes espacios de estocaje y obliga implementar modelos de demanda bajo pedido (Wang *et al.*, 2019). Adicionalmente, un mayor aligeramiento en el peso final de los prefabricados repercute positivamente reduciendo los costes derivados del transporte, las emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso logístico y favorece la posterior ejecución de los sistemas constructivos al facilitar el trabajo del operario (Zaragoza-Benzal *et al.*, 2023a).

Por todo ello, en este trabajo se aborda de forma original el estudio y caracterización de unos novedosos prefabricados de escayola con incorporación de NFU en su matriz. Analizando no solo la viabilidad técnica derivada de su proceso de fabricación, sino también el análisis de su cadena de suministro mediante el empleo de programas de simulación.

### A. Revisión del estado del conocimiento actual

En la actualidad, la producción de neumáticos ha aumentado drásticamente, tanto es así, que según algunos estudios para el año 2027 esta industria generará 2700 millones de unidades de estos productos para satisfacer la demanda del mercado (Zerin *et al.*, 2023). Además, es sabido que, para producir un único neumático, se liberan a la atmosfera cerca de 330 g de CO<sub>2</sub>, siendo por tanto una contribución importante para el calentamiento global (Derakhshan *et al.*, 2017). Estas cifras son aún más significativas si se toman en cuenta los últimos estudios, los cuales resaltan que el número de NFU existentes en la superficie terrestre como vertedero es de aproximadamente 4000 millones de unidades (Thomas & Gupta, 2016). A pesar de que varios métodos se han empleado para mejorar la gestión de estos residuos, tales como: almacenamiento en vertederos controlados, incineración, aprovechamiento energético, pirólisis o la producción de humo negro, sus aplicaciones actuales siguen estando muy limitadas y ofrecen múltiples posibilidades para la investigación (Zakerzadeh *et al.*, 2024).

Los NFU pueden reciclarse a través de su trituración, desmenuzándose para separar el caucho en diferentes granulometrías, el cual puede ser empleado como materia prima secundaria en el proceso de fabricación otros productos (Tafreshi *et al.*, 2023). Esto hace, en los NFU se empiecen a considerar como un recurso compatible con algunas aplicaciones dentro del área de la ingeniería civil y la edificación. En la Tabla I, se recoge la distribución porcentual de los componentes de un neumático común empleado en automóviles.

TABLA I  
COMPOSICIÓN DE LOS NEUMÁTICOS PARA AUTOMÓVIL

| Componente                | (%) Peso |
|---------------------------|----------|
| Caucho/Elastómeros        | 43       |
| Negro de Carbono y Sílice | 28       |
| Acero                     | 13       |
| Textil                    | 5        |
| Óxido de Zinc             | 2        |
| Azufre                    | 1        |
| Acelerantes/Antioxidantes | 2.5      |
| Ácido esteárico           | 1        |
| Aceites                   | 7        |

Fuente: SIGNUS Ecovalor, S.L. (Año: 2023).

Este trabajo, se centra en la aplicación de los residuos de caucho procedentes de NFU de diámetro comprendido entre 2-4 mm, para su aplicación en la industria de los prefabricados para edificación. En este sentido, son varios los trabajos previos que se han realizado en el área, tratando de analizar la viabilidad técnica derivada de la integración de los residuos de NFU en materiales compuestos de yeso y escayola. Aunque este trabajo da un paso más, y pretende avanzar hacia la industrialización del sector de la construcción y la gestión eficiente de la cadena de suministro, es conveniente incluir los resultados más representativos obtenidos por otros investigadores (Tabla II).

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LOS ESTUDIOS PREVIOS REALIZADOS CON MATERIALES COMPUESTOS DE YESO Y NFUS

| Referencia                              | Tipo de caucho                   | Resultados relevantes   |
|---|----------------------------------|---|
| (Serna <i>et al.</i> , 2013)            | 0-1 mm; 1-2 mm; 2-4 mm           | Se emplearon porcentajes de sustitución en volumen del 1% - 3% - 5%, notando una disminución progresiva de las resistencia a mecánica al aumentar el contenido en caucho y la ratio agua/yeso. No hubo diferencias significativas en función del tamaño del residuo.  |
| (Herrero <i>et al.</i> , 2013)          | 0-0.6 mm; 0.5-2.5 mm; 2.5-4.0 mm | Se emplearon sustituciones en volumen del material de escayola original hasta el 60%. Se obtuvo igualmente una disminución progresiva de la resistencia mecánica, pero se observó una mejora en el comportamiento acústico y térmico de los compuestos de escayola elaborados con estas materias primas secundarias.  |
| (López <i>et al.</i> , 2017)            | 0-0.6 mm; 0.5-2.5 mm; 2.5-4.0 mm | Este trabajo tuvo como objetivo analizar el comportamiento frente al agua de los compuestos de escayola elaborados con sustitución parcial en volumen por residuos de caucho de hasta el 60%. Se observó una disminución en el tamaño cristalino de las muestras con mayor contenido en caucho y variaciones en la absorción de agua y la porosidad final de las escayolas. |
| (Pinto <i>et al.</i> , 2020)            | 0.60 mm y 1.19 mm                | Mayor adhesión yeso-caucho en la fracción polvo de residuo de diámetro 0.60 mm, presentando una elevada capacidad para mantener la temperatura interna durante los períodos más fríos, aunque menores resistencias mecánicas.   |
| (Castellón <i>et al.</i> , 2022)        | 0 – 0.5 mm                       | Se produce una disminución de densidad y resistencia mecánica de los compuestos de yeso con adición de NFU. Además, estos residuos reducen la eficacia de los revestimientos de yeso en la protección de elementos constructivos y estructurales contra el fuego.   |
| (Zaragoza-Benzal <i>et al.</i> , 2023b) | 2.5 – 4.0 mm                     | Se realizaron sustituciones parciales en peso del 9 y 18% en peso, empleando a su vez fibras recicladas de aislamiento térmico para mejorar la resistencia mecánica final. Se obtuvieron compuestos con buenas prestaciones para su aplicación en la edificación y se diseñó un bloque prefabricado para construcción modular.  |

Como se puede apreciar en la Tabla II, la mayoría de los estudios existentes en la literatura abordan ensayos de laboratorio enfocados en la caracterización físico-mecánica del material. Así, encontramos una coincidencia entre diferentes autores en qué existe una disminución progresiva de la resistencia a flexión y compresión conforme se incrementa el contenido en caucho reciclado adicionado, siendo mejor el comportamiento para la fracción de caucho con diámetro superior a 1 mm. Además, se ha podido corroborar como la adición de estas materias primas secundarias resulta beneficiosa para mejorar el comportamiento térmico y acústico de los materiales compuestos de yeso, siendo esta una de sus principales aplicaciones en la actualidad. De igual forma, se ha conseguido reducir la absorción de agua al incorporar es caucho impermeable en la matriz, existiendo una buena adhesión entre el residuo y la escayola. También se destaca que, debido a la naturaleza combustible de estos compuestos reciclados, la incorporación de caucho de NFU en el proceso de elaboración de los materiales de yeso puede comprometer la estabilidad frente al fuego del producto puesto en obra. Así, existe un compromiso entre la sostenibilidad y la durabilidad de los materiales que se ve comprometido, si bien se aprecia una disminución final en los costes de fabricación.

No obstante, se puede observar que ninguno de los trabajos encontrados en la literatura aborda el problema de la cadena de suministro en este tipo de materiales de construcción. Si bien es cierto que, podemos encontrar investigaciones que abordan este problema en materiales aligerados de escayola con incorporación de fibra textil de NFU (Zaragoza-Benzal *et al.*, 2023a). No obstante, las herramientas y métodos de simulación para analizar los procesos logísticos están en constante desarrollo y su potencial de aplicación todavía no ha sido completamente explotado por los profesionales del sector.

Por tanto, el objetivo de este trabajo es mostrar las posibilidades de aplicación de los residuos procedentes de NFU como materia prima secundaria en el proceso de fabricación de placas de escayola. Para ello, se lleva a cabo un proceso experimental dividido en varias etapas. En primer lugar, se analizan el entorno general y específico para evaluar las posibilidades que ofrece el mercado actual. Posteriormente, se desarrolla una campaña experimental de laboratorio para analizar la viabilidad técnica derivada del empleo de estos materiales compuestos. Y, finalmente, se realiza un estudio de su cadena de suministro, recogiendo las principales ventajas derivadas del empleo de estos productos como alternativa a los materiales tradicionalmente utilizados en obra.

## II. ANÁLISIS DEL ENTORNO

El mercado de los prefabricados en España ha experimentado un crecimiento progresivo como consecuencia de la demanda cada vez mayor de nuevas soluciones constructivas más eficientes y sostenibles (Mordor, 2024). Este tipo de productos se caracterizan por su elaboración en procesos controlados, tratando de reducir al máximo los errores de diseño y minimizando los riesgos climatológicos. La incorporación de materias primas recicladas ha supuesto a su vez un rediseño en el proceso de elaboración de estos productos, en línea con las políticas de sostenibilidad impulsadas por el Pacto Verde Europeo del año 2019 (Romero-Gómez *et al.*, 2023). Además, la demanda de piezas prefabricadas personalizadas es cada vez mayor, impulsada por los novedosos diseños arquitectónicos y las soluciones alternativas de los constructores actuales.

### A. Análisis PESTEL simplificado

El análisis PESTEL es una herramienta que ayuda a comprender el entorno general externo a la empresa:

**Factores Políticos:** España está adoptando regulaciones más estrictas sobre el uso de materiales reciclados y la sostenibilidad en la construcción (Ley por el Cambio Climático y Transición Energética, 2021), lo que puede suponer una oportunidad para este tipo de tecnologías más sostenibles.

**Factores Económicos:** La alta demanda de prefabricados afecta de forma positiva a la utilización de materias primas secundarias durante la fabricación, ya que de esta manera se reduce el precio unitario y surgen economías de escala.

**Factores Sociales:** Repercuten positivamente la concienciación medioambiental cada vez mayor de la sociedad y la búsqueda de soluciones más eficientes.

**Factores Tecnológicos:** El avance hacia una Industrial 4.0 de la construcción e integración de nuevas tecnologías, permitirá aumentar la eficiencia de la producción y reducir costes.

**Factores Ambientales:** La recepción de estos productos como una solución eco-amigable puede incentivar su demanda y potenciar la inversión en I+D+i.

**Factores Legales:** El empleo de materias primas recicladas se posiciona del lado de las regulaciones y estándares actuales fijados por la industria constructora.

### B. Análisis PORTER simplificado

Se trata de una herramienta empleada para analizar el entorno competitivo de la empresa o negocio a evaluar, estudiando cómo afectan las cinco principales fuerzas de acción sobre el negocio objetivo.

**Rivalidad entre competidores existentes.** Esta competencia puede ser moderada en el mercado de la prefabricación como consecuencia de:

- Elevado número de empresas dedicadas a la prefabricación, algunas de ellas multinacionales.
- La incorporación de caucho puede actuar como fuente de ventaja competitiva en diferenciación de producto.
- Los costes de cambio de proveedor por parte del cliente pueden ser moderados, lo en presencia de productos complementarios o sustitutivos podría afectar a la rentabilidad de estos productos.

**Amenaza de nuevos competidores,** impulsada por la facilidad para acceder a la materia prima reciclada que se emplea en estos prefabricados.

- Posibilidad de encontrar barreras de entrada por parte de los competidores ya establecidos en el mercado.
- Las empresas multinacionales, con mayor envergadura, pueden alcanzar umbrales altos de producción y generar economías de escala fácilmente. Siendo necesario en este caso emplear estrategias de cooperación.

**Poder de negociación de proveedores.** Este se entiende limitado debido a la gran cantidad de empresas existentes en el mercado como suministradores de materias primas.

**Poder de negociación de clientes.** Se entiende amplio como consecuencia del elevado grado de sensibilización de estos clientes frente al precio. Se pueden seguir estrategias de integración vertical y realizar un análisis en profundidad de la cadena de valor. En este sentido, una reducción en los costes logísticos puede afectar positivamente a este mercado.

**Amenaza de productos sustitutivos.** Otros materiales igualmente sostenibles y con prestaciones semejantes pueden suponer una amenaza a la rentabilidad de estos productos. En este caso, sería importante llevar a cabo acciones de marketing y difusión en redes.

TABLA III  
ANÁLISIS DAFO

| DEBILIDADES  | AMENAZAS   |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Desconocimiento por parte de las empresas del sector de las ventajas de estos nuevos productos con NFU.</li> <li>✓ Elevadas fuentes de inversión inicial para superar el umbral mínimo de rentabilidad.</li> <li>✓ Limitaciones en el diseño.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Competencia elevada en el sector de la construcción y llegada de prefabricados alternativos.</li> <li>✓ Fluctuaciones en la disponibilidad de las materias primas recicladas.</li> <li>✓ Dependencia de las normativas ambientales y técnicas.</li> </ul>   |
| FORTALEZAS   | OPORTUNIDADES  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Enfoque innovador derivado de la integración del caucho como materia prima secundaria.</li> <li>✓ Disminución en los costes de fabricación.</li> <li>✓ Compromiso medioambiental y con la sostenibilidad por parte de las empresas.</li> <li>✓ Facilidad de montaje y menos tiempo de ejecución.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Evolución del mercado y tendencia actual hacia la eficiencia energética y la construcción sostenible.</li> <li>✓ Apoyo de las instituciones y políticas medioambientales actuales para la reutilización de materias primas recicladas.</li> <li>✓ Colaboración con proveedores de materias primas recicladas y posibles socios en la industria constructora.</li> </ul> |

### III. METODOLOGÍA

En este apartado, se describe la metodología llevada a cabo en esta investigación. Así, se incluyen tanto las materias primas empleadas y proceso de fabricación seguido para la elaboración de las placas prefabricadas, como la campaña experimental desarrollada y estudios realizados.

#### A. Materiales

Para la elaboración de los diferentes prefabricados diseñados para esta investigación se han empleado escayola, agua y residuos de caucho procedentes de NFU.

**Escayola:** tipo E35 Iberyola, se caracteriza por su pureza, finura de molido y blancura. Estos yesos de alta calidad han sido suministrados por la empresa Saint-Gobain Placo Ibérica, S.A. Algunas de sus principales características se recogen en la Tabla IV y han sido facilitadas por el fabricante.

TABLA IV  
 CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL DE ESCAYOLA EMPLEAD  
 (Fuente: Saint-Gobain Placo Ibérica, 2023)

|   |         |
|---|---------|
| <b>Conductividad Térmica (W/m·K)</b>                | 0.30    |
| <b>Difusión al vapor de agua (<math>\mu</math>)</b> | 6       |
| <b>Índice de pureza (%)</b>                         | 92      |
| <b>Reacción al fuego EN 15824:2009</b>              | A1      |
| <b>Granulometría (mm)</b>                           | 0 – 0.2 |

**Agua:** procedente del Canal de Isabel II de la Comunidad de Madrid (España). Se trata de agua potable con un contenido en cloro total inferior a 0.96 mg/l y pH de 8.38.

**Residuos de caucho:** procedentes de NFU con un diámetro medio comprendido entre 2–4 mm. Estos compuestos fueron suministrados por la organización sin ánimo de lucro SIGNUS Ecovalor, S.L. (Madrid, España). Se caracterizan por tener una densidad aparente aproximada de 1100 kg/m<sup>3</sup> y un contenido en humedad menor del 0.75%.

#### B. Preparación de los prefabricados

Durante el proceso de fabricación de los diferentes compuestos desarrollados en este trabajo se siguieron las recomendaciones de la norma EN 13279-2. Las proporciones en masa empleadas se recogen en la Tabla V.

TABLA V  
 DOSIFICACIONES EMPLEADAS EN MASA

| Tipo        | Escayola (g) | Agua (g) | NFU (g) |
|-------------|--------------|----------|---------|
| E0.65       | 1000         | 650.0    | —       |
| E0.65 – 5%  | 950          | 617.5    | 82.5    |
| E0.65 – 10% | 900          | 585.0    | 165.0   |
| E0.65 – 15% | 850          | 552.5    | 247.5   |

Como se puede apreciar en la Tabla V, se produce una disminución progresiva en el consumo de materias primas originales. De esta manera, se alcanza hasta un 15% en sustitución en volumen del material de escayola original por NFU reciclado. Adicionalmente, se puede ver como en todos los compuestos se mantuvo una relación agua escayola de 0.65 en peso. Esta ratio fue fijada experimentalmente y se corresponden con una consistencia trabajable de la mezcla.

En la Figura 1, se muestra el estado final de las placas elaboradas con los diferentes porcentajes de sustitución planteados en esta investigación.



Fig. 1. Diseño de placas prefabricadas, ubicadas de izquierda a derecha por porcentajes del 5% a 15% de sustitución por NFU.

Así pues, una de las principales ventajas de este proceso de fabricación es el ahorro en costes como consecuencia de la disminución en el consumo de recursos primarios. En este sentido, tomando como referencia los precios por kilogramo de cada material empleado: escayola (0.15235 €/kg); agua (0.00149 €/kg) y caucho reciclado (0.05000 €/kg), nos llevaría a los siguientes costes aproximado por placa de 40 × 30 × 1.5 cm<sup>3</sup> recogidos en la Tabla VI.

TABLA VI  
 COSTES UNITARIOS DE PLACA PREFABRICADA EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN DE CAUCHO RECICLADO

| Sustitución | —      | 5%     | 10%    | 15%    |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| Coste (€)   | 0.1533 | 0.1498 | 0.1462 | 0.1427 |

Esta disminución unitaria en costes llevada a una escala de producción mayor podría tener varios impactos positivos, tales como:

- Ventaja competitiva en costes, al poder reducir el precio final de los productos elaborados bajo estas premisas. Esto permitiría, junto con unas adecuadas estrategias de marketing, llevar a cabo estrategias de penetración de mercados y captar nuevos clientes.
- Mejorar el margen de ganancia, lo que se conseguiría no solo reduciendo el coste final unitario de cada producto, sino también vinculado el desarrollo de estas placas con estrategias de diferenciación de producto que apuesten por una construcción sostenible.

Cabe destacar en este punto, que la producción de materiales de yeso en España para el año 2021 se incrementó hasta en 14 millones de toneladas métricas (Reichl & Schatz, 2023). Por este motivo, cualquier esfuerzo por reaprovechar y reutilizar materias primas secundarias para la fabricación de nuevos productos prefabricados tendrá un gran impacto positivo para mitigar el impacto ambiental que produce la industria constructora.

#### C. Programa experimental

La campaña experimental desarrollada ha tenido como objetivo realizar una caracterización física y mecánica de las placas prefabricadas desarrolladas en la investigación. Para ello, se han llevado a cabo ensayos normalizados de resistencia a flexión, dureza superficial, densidad aparente y conductividad térmica, por considerarse estas propiedades críticas a la hora de seleccionar una placa o panel prefabricado.

- Densidad aparente, entendida como la relación entre la masa en estado seco y el volumen aparente de las muestras analizadas, se ha determinado siguiendo las indicaciones de la norma EN 13279-2.
- Conductividad térmica, empleando muestras de tamaño  $24 \times 24 \times 3 \text{ cm}^3$ , se ha determinado con ayuda de un mini Hot-Box equipado con termopares.
- Resistencia a flexión en placas, en la que se ha determinado la carga máxima de rotura medida sobre prefabricados de dimensión  $40 \times 30 \times 1.5 \text{ cm}^3$ . Para la realización de este ensayo, se han seguido las indicaciones de la norma UNE-EN 12859:2012.
- Dureza superficial, medida con ayuda de un durómetro Shore C según la norma UNE 10242: 2023, tomando cinco medidas por cada placa separadas entre sí y de los bordes un mínimo de 20 cm.

Finalmente, con el objetivo de esclarecer la discusión de los resultados mecánicos, se ha realizado un análisis SEM sobre la muestra extraída de la matriz del compuesto de yeso endurecido y previamente recubierto por una fina película de oro con ayuda de una metalizadora modelo Cressington 108auto (Walford, UK). El ensayo se realiza empleando un microscopio electrónico de barrido TESCAN Vega 4 (Walford, UK), con cátodo luminiscencia a color y dos detectores EDX Bruker ( $30 \times 60 \text{ mm}^2$ ), operando a 20 kV.

#### D. Análisis de la cadena de suministro

Para realizar este estudio se ha hecho uso del software FlexSIM, con el que se realiza una simulación de la línea de producción y de la red de transporte, lo que posibilita obtener una recopilación de datos ajustados a la realidad.

Para la simulación se han considerado que las dimensiones de las placas sean las mismas al de los ensayos a flexión ( $40 \times 30 \times 1.5 \text{ cm}^3$ ). Esta simulación se ha realizado en condiciones óptimas de rendimiento por lo que evalúa los resultados potenciales ideales, en los que los operarios se encuentran completamente descansados y sin ninguna fatiga, y no hay fallas en el proceso de producción ni en el transporte.

Se ha empleado una jornada laboral continua de 8h (de 8:00 am -16:00 pm) y se estima que la velocidad del operario en la manipulación a mano (carga y descarga) de la placa de escayola alcanza los 1.18 m/s. Por lo que, de acuerdo con la velocidad y masa de la placa transportada, se entiende que a menor densidad la velocidad de transporte de las placas de escayola será mayor. Por este motivo, la relación es inversamente proporcional entre la velocidad y masa de la placa transportadas, esto es 1.18 m/s, 1.22 m/s, 1.25 m/s y 1.26 m/s para las muestras de referencia E0.65 y con sustitución de NFU del 5%, 10% y 15%.

El ritmo de producción es el mismo para todos los tipos de placas de prefabricados de escayola (fijado en 30 s/placa) y el tiempo de procesado en cada línea producción es de 10 s. A través de una simulación analizamos como afecta a la producción el proceso de fabricación de placas de escayola con diferentes concentraciones de caucho reciclado. La placa de escayola se obtiene mediante un proceso industrial de fabricación en continuo, que se encuentra totalmente automatizado y controlado informáticamente.

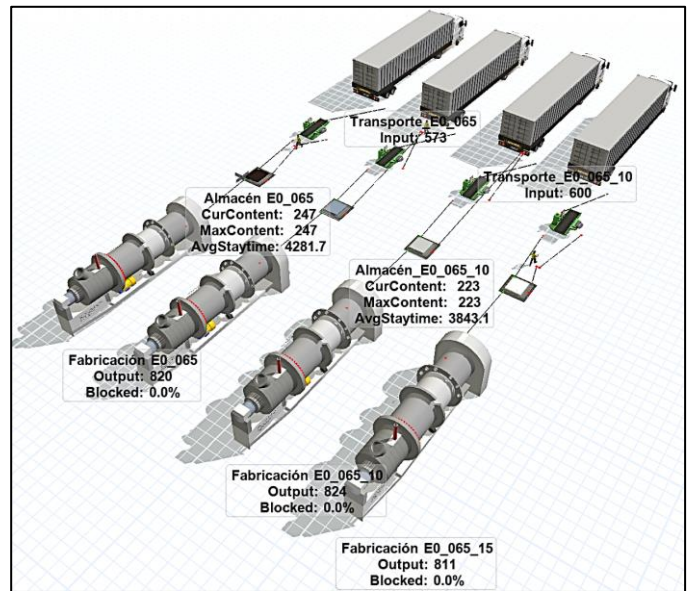


Fig. 2: Imagen de la simulación del proceso en FlexSIM.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la presentación de los resultados obtenidos en este trabajo, se recoge en primer lugar el análisis de la campaña experimental realizada y, posteriormente, un estudio de la cadena de suministro de estos productos diseñados.

#### A. Resultados de la campaña experimental

En primer lugar, se muestran los valores obtenidos para los ensayos de resistencia a flexión y dureza superficial en las diferentes placas elaboradas. La disposición para la realización de los ensayos mecánicos en prefabricados se puede ver en la Figura 3.



Fig. 3. Disposición para el ensayo a flexión en placas.

De esta manera, los valores obtenidos para estos ensayos se recogen en la Figura 4.

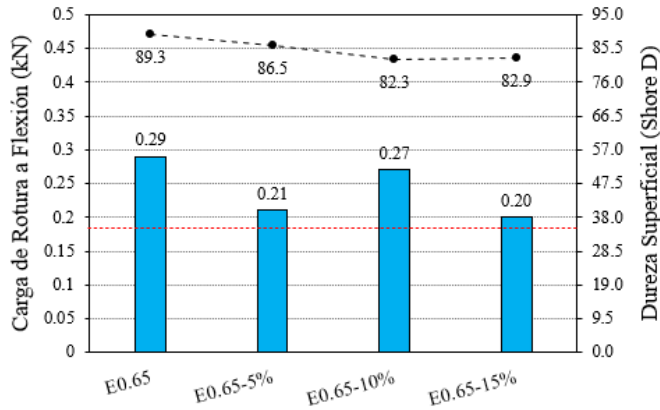


Fig. 4. Resistencia a flexión (incluyendo valor mínimo normativo, línea roja 0.18 kN) y dureza superficial de las placas.

En primer lugar, se puede apreciar una disminución de la dureza superficial conforme se incrementa el contenido en caucho reciclado adicionado. Así pues, se ha llegado a obtener una reducción en la dureza superficial de hasta el 7.84% con respecto al material de escayola tradicional. Un efecto similar fue observado por Álvarez *et al.*, en su investigación con diferentes tipologías de residuos procedentes de neumático (Álvarez *et al.*, 2022). Así mismo, ha sido corroborado en diversas investigaciones como la incorporación de residuos plásticos elastómeros reduce la dureza superficial y la rigidez de los prefabricados de escayola (Serna *et al.*, 2013).

Por su parte, también se ha podido observar una disminución con respecto al material de referencia en la resistencia a flexión en placas. Si bien es cierto que todos los compuestos superaron el valor mínimo de 0.18 kN, ninguna de las placas ensayadas superó al compuesto de referencia E0.65. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en otras investigaciones donde se empleaban residuos plásticos para aligerar compuestos de yeso o escayola (Álvarez *et al.*, 2024). No obstante, en situaciones reales de empleo estos materiales estarían reforzados con fibras o con papel Kraft para mejorar su capacidad mecánica, por lo que desde el punto de vista de su aplicación todos los compuestos elaborados serían susceptibles de ser utilizados (Castro Sales *et al.*, 2021).

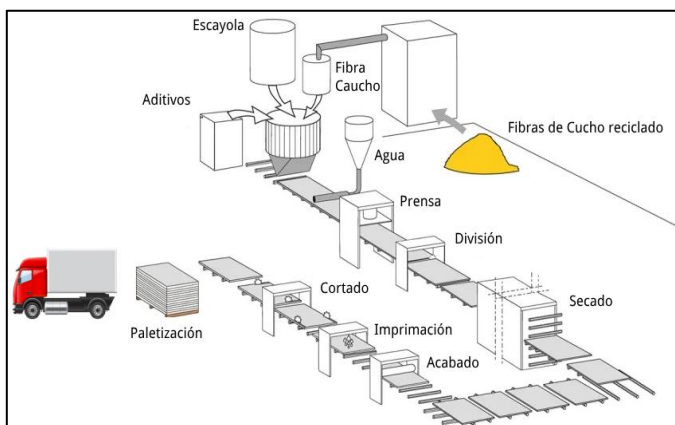


Fig. 5. Esquema del proceso de fabricación de placas prefabricadas (Fuente: Costrunario, 2023).

La Figura 5, recoge un proceso de fabricación estándar donde muestra como una parte importante en el desarrollo de estos productos es la etapa de acabado en las placas. En cualquier caso, en la Figura 6 se muestran una imagen obtenida mediante análisis SEM para la muestra de E0.65-15% con el objetivo de conocer la integración del residuo adicionado en la matriz de escayola.

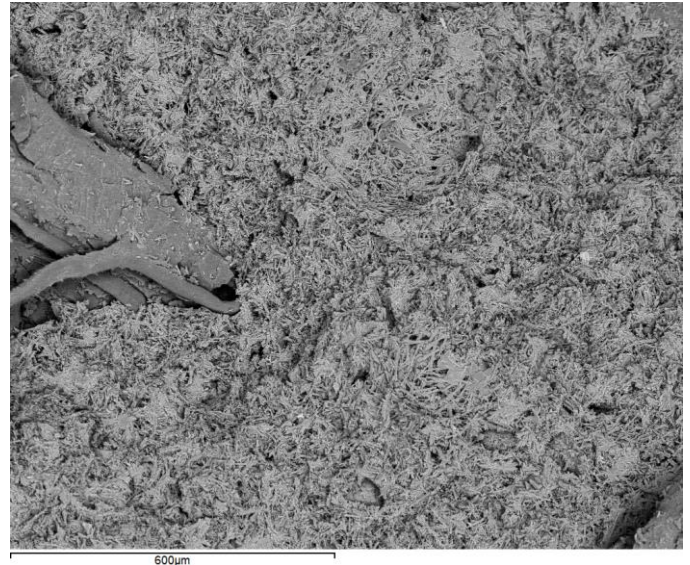


Fig. 6. Imagen SEM de la muestra E0.65-15%.

Como se puede observar en la Figura 6, la incorporación de residuos de caucho procedentes de NFU no interfiere el correcto fraguado del material de escayola. De esta manera, se observa una matriz homogénea con los característicos cristales en forma de aguja propios de Dihidrato obtenido tras la hidratación del material base. Asimismo, se aprecia una buena integración entre el residuo y la matriz, con el crecimiento de cristales en la interfase caucho-escayola y con una buena adherencia entre ambos. Esto supone un efecto positivo a la hora de evitar el desprendimiento del caucho adicionado y repercute favorablemente en las propiedades mecánicas de los compuestos elaborados con esta composición.

De la misma forma, estos residuos de caucho adicionados modifican la densidad aparente final del compuesto en estado endurecido y su coeficiente de conductividad térmica. Esto se puede observar en los resultados presentados en la Figura 7.

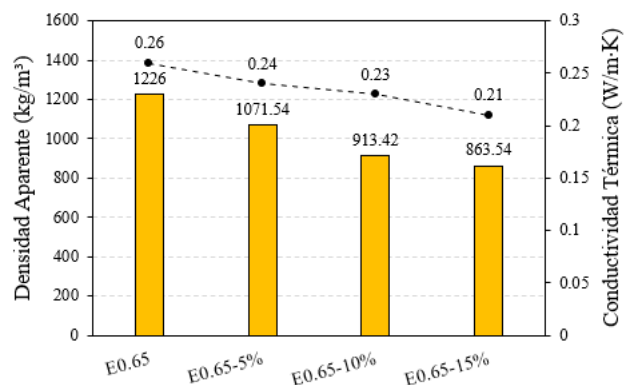


Fig. 7. Resultados de los ensayos de conductividad térmica y densidad aparente de los compuestos elaborados.

Así, en la Figura 7 se puede apreciar cómo se produce una disminución progresiva de la densidad aparente de los compuestos diseñados al incrementar el contenido en caucho reciclado. Este efecto resulta muy beneficioso para el diseño de prefabricados, ya que permite reducir los costes de distribución y agilizar los procesos de montaje en obra (Ferrández *et al.*, 2023). Por otro lado, esta reducción en la densidad aparente está íntimamente relacionada con la pérdida de resistencia a flexión en los compuestos elaborados.

Otro efecto vinculado a reducción de la densidad es la disminución en la conductividad térmica de estos materiales. Se puede observar como el compuesto con mayor contenido en residuo de NFU presenta una conductividad térmica un 20% inferior al material de referencia. Esto supone un avance en términos de eficiencia energética y consumo responsable en la edificación, ya que es sabido que los edificios de viviendas son responsables de la demanda de cerca del 40% de energía producida en la UE (Santos *et al.*, 2022). Así pues, la incorporación de residuos sólidos urbanos al proceso de fabricación de nuevos materiales de construcción se establece como una alternativa al desarrollo de productos con propiedades térmicas mejoradas y más sostenibles medioambientalmente (Corinaldesi *et al.*, 2015).

### B. Estudio de la actividad en fabrica

En este apartado, se realiza un análisis de los resultados obtenidos para la simulación del proceso de distribución de las placas y paneles prefabricados. Así, en una primera gráfica, la Figura 8 recoge los resultados de la simulación para las variaciones en la productividad de las placas y paneles prefabricados. Por otro lado, la Figura 9, representa los tiempos de actividad en fábrica destinados por cada operario en cada placa o panel elaborado.

De esta manera, los resultados de la simulación reflejan un incremento de la productividad en el proceso de paletizado y almacenaje de placas y paneles al incrementar el contenido en NFU adicionado. Esto es consecuencia del aligeramiento progresivo de las placas elaboradas conforme se incrementa la sustitución del material de escayola por caucho reciclado. En este sentido, un remplazo en volumen del 15% de material tradicional por NFU triturado conllevaría un incremento de la productividad próximo al 8.7%, conforme a los parámetros de simulación antes establecidos.

De la misma forma, la distribución de tiempos de actividad experimenta una variación sensible al tipo de prefabricado transportado. Así, los más ligeros aumentan el tiempo ociosos del operario en fabrica y reducen el número de viajes en carga. Esto se traduce en que el operario terminaría antes su trabajo y dispondría de tiempo extra, el cual se puede emplea de diferentes maneras (Ferrández *et al.*, 2023):

- Capacitación del operario: aprovechando el tiempo para mejorar la formación del empleado en temas vinculados con la seguridad en el trabajo, nuevas tecnologías disponibles, mantenimiento de equipos, etc.
- Reorganización del espacio de trabajo, asignado tareas de limpieza, orden y control del entorno, que favorecen un ambiente laboral seguro y un progresivo incremento de la eficiencia.
- Realización de tareas administrativas, esto es, dedicando tiempo a la cumplimentación de informes diarios de calidad, supervisión de la instalación o actualización de bases de datos entre otros posibles.
- Asignación de trabajo en equipo, para realizar tareas complementarias al proceso de carga y descarga, lo que implicaría un aumento de la productividad en las diferentes líneas de fabricación.

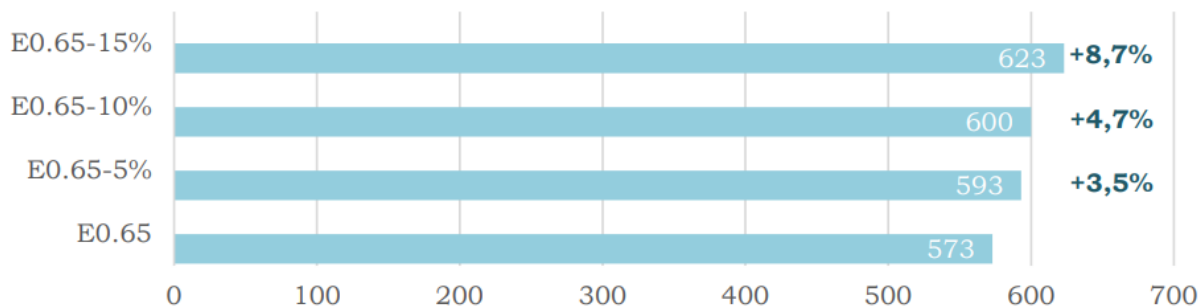


Fig. 8. Variaciones en la productividad (número de placas/jornada de trabajo) en función del tipo de placa elaborada.

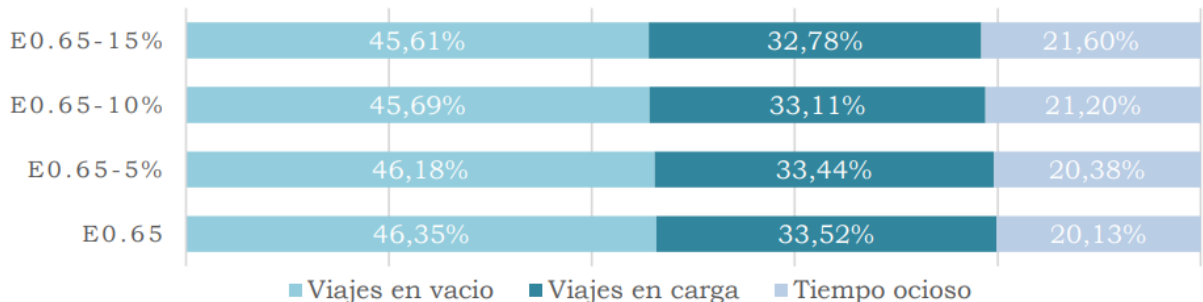


Fig. 9. Distribución de los tiempos de actividad del operario en fabrica dentro del proceso logístico.

C. Implicaciones para el transporte

Este estudio de distribución permite conocer cómo afecta en el transporte la incorporación de caucho reciclado a los paneles prefabricados de escayola. Se realiza un análisis de los resultados obtenidos de una simulación del proceso de entrega desde la fábrica hasta el distribuidor. Para esta simulación se tendrán en cuenta los siguientes supuestos: un recorrido de 100 km desde la fábrica hasta el almacén, el coste actual del combustible diésel en España (1.632 €/l) y las dimensiones de los paneles a transportar serán de 40 × 30 × 1.5 cm<sup>3</sup>. La simulación trata de la realización de una comparativa entre tres tipos de transportes considerados estándares, detalladas sus características en la Tabla VII.

TABLA VII  
 CARACTERÍSTICAS DE LOS TRANSPORTES EMPLEADOS

| Característica                     | Furgón | Camión | Tráiler |
|------------------------------------|--------|--------|---------|
| Masa propia (kg)                   | 2000   | 8000   | 10000   |
| Carga útil de transporte (kg)      | 1400   | 12000  | 25000   |
| Volumen de carga (m <sup>3</sup> ) | 9.3    | 45     | 83      |
| Consumo (litros/100 km)            | 11     | 27     | 40      |

Así pues, una vez definidas las diferentes tipologías de transporte empleadas y sus características, se ha realizado un estudio de los consumos totales en litros de Diesel imputados por cada placa transportada en función de vehículo seleccionado. Para ello, se han parametrizado todos los valores necesarios en el programa FlexSIM, tal y como se muestra en la Figura 10.

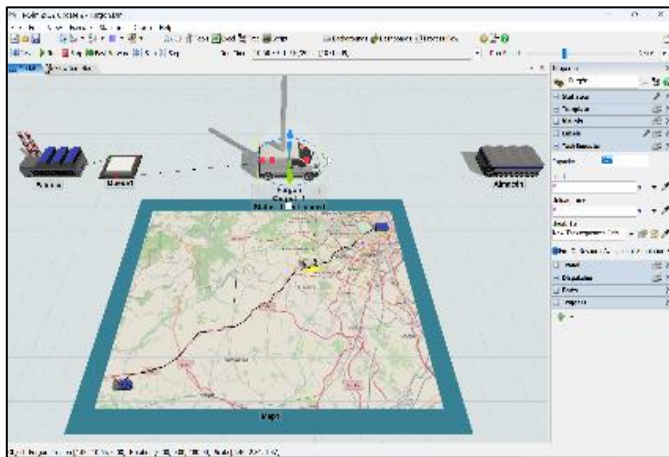


Figura 10. Simulación FlexSIM del transporte de placas.

Cabe destacar que, si bien el software es capaz de reconocer el trazado irregular de las carreteras para hacer la simulación, este no procesa la altimetría para tomar en consideración el desnivel. En este sentido, las posibles variaciones de consumo como consecuencia de los altibajos del terreno quedan camuflados en el programa, considerándose una velocidad uniforme en el trayecto y un consumo dependiente únicamente de la carga transportada. Así bien con los datos de partida señalados y los valores experimentales obtenidos en la Figura 7, se han determinado los consumos unitarios por placa recogidos en la Figura 11.

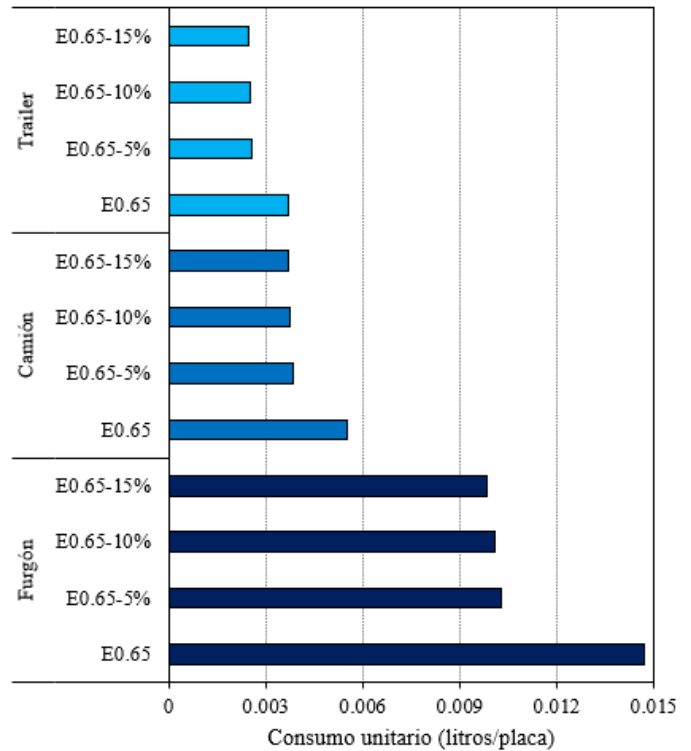


Figura 11. Consumo de combustible por placa transportada.

Como se puede observar en la Figura 11, se produce una disminución en consumo unitario por placa conforme se incrementa el tamaño del vehículo de carga. Este fenómeno guarda relación con las economías de escala, de tal forma que cuanto mayor sea el pedido de placas, menor será el coste derivado de su distribución. Así, para una elevada de demanda de estos productos, las empresas constructoras podrían emplear estrategias de “rappel” de precios para grandes pedidos con el objetivo de ser más competitivas. Adicionalmente, se aprecia en la misma Figura 11, cómo se reduce el consumo conforme se incrementa el contenido en material reciclado introducido en la placa. Esto es debido a que, al reducir el peso final de prefabricado, se puede incrementar el número de placas transportadas en cada viaje, por lo que el consumo por unidad se ve reducido de forma progresiva.

En este sentido, se observa cómo se produce a su vez una disminución en el consumo de materias primas tradicionales, a la vez que se reducen los gastos derivados del transporte. Por este motivo, la utilización de materias primas secundarias puede revertir en un mayor beneficio empresarial y en una mejora de la competitividad en el mercado (Altamura *et al.*, 2023; Shih *et al.*, 2024).

Por último, una vez analizada la repercusión económica que se deriva del empleo de estas materias primas secundarias en el proceso de fabricación de placas prefabricadas, se ha llevado a cabo un análisis medioambiental. Para ello, en la Figura 12, se recogen los valores obtenidos para las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera como consecuencia del transporte de estos productos, tomando en consideración el vehículo y tipología de placa transportada. Estos resultados, ponen de manifiesto la importancia de aligerar el peso de los prefabricados para mitigar el impacto ambiental del proceso logístico.

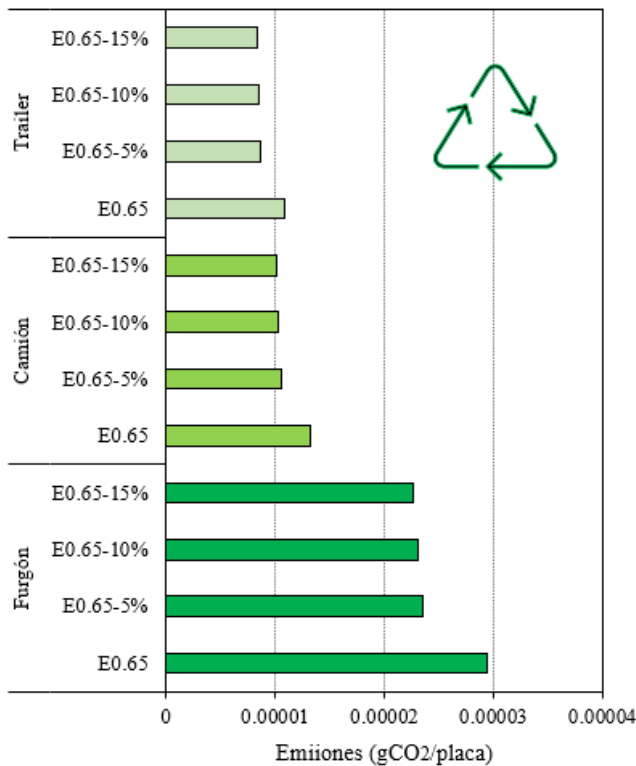


Figura 12. Emisiones de CO<sub>2</sub> por placa transportada.

Teniendo en cuenta el principio de quien contamina paga y la responsabilidad extendida del productor al proceso de distribución, se puede observar en la Figura 12 como la incorporación de residuos de caucho puede ser favorable para reducir los costes imputados al transporte. En este sentido, se observa como las placas con un mayor contenido en caucho granulado, presentan unas menores emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad transportada. Lo que supone un avance hacia la consecución de nuevos productos medioambientalmente neutros y circulares (Li *et al.*, 2018).

Adicionalmente, al aumentar el número de placas transportadas por vehículo, este efecto en la reducción de las emisiones se hace aun más significativo. Por ello, la aplicación de economías de escala es igualmente beneficiosa desde el punto de vista medioambiental para estos productos.

Así, en base a los resultados obtenidos, la integración vertical dentro de la cadena de suministro se convierte en una opción interesante para las empresas del sector que trabajan con esta tipología de productos. Así, convertirse en distribuidores de estas placas y paneles puede suponer una potencial fuente de reducción de costes, ayudando a la fidelización con el cliente al mejorar el servicio de venta y evitando la acumulación excesiva de stocks.

Cabe destacar a su vez, la necesaria inversión en I+D+i para favorecer el desarrollo de nuevos productos aligerados que reporten un mayor beneficio económico-medioambiental (Hand & Chai, 2024). En este sentido, las empresas actuales que consigan grandes cuotas de mercado para la distribución de prefabricados ecoeficientes pueden aprovechar para reinvertir parte del capital generado en la búsqueda de soluciones alternativas más sostenibles.

## V. CONCLUSIONES

El rediseño de los procesos de fabricación de los materiales de construcción tradicionalmente empleados se ha convertido en uno de los grandes retos para el S. XXI. La UE como motor de cambio y promotora de nuevas prácticas sostenibles en la industria de la construcción, apuesta por la reincorporación de materias primas secundarias en la elaboración de nuevos productos e introducir así criterios de economía circular en el sector de la edificación. En esta investigación, se ha desarrollado un prototipo de placa prefabricada que consigue reducir hasta en un 15% el consumo de materias primas tradicionales, y, reemplazarlas por residuos de caucho procedente NFU. Las conclusiones más relevantes que se pueden extraer de este estudio son:

- La sustitución progresiva del material de escayola original por residuos de NFU permite reducir la densidad de los prefabricados, con lo que se disminuye la conductividad térmica por conducción hasta en un 19% con respecto al material tradicional.
- En lo referente a la resistencia mecánica a flexión en placas, si bien es cierto que se reduce de forma progresiva al incrementar el contenido en material reciclado añadido, en todos los casos se superó el valor mínimo de carga de rotura fijado en 0.18 kN. Además, las imágenes por microscopía presentan una buena integración entre el residuo y la matriz.
- Como consecuencia del aligeramiento en los paneles prefabricados, se consigue aumentar la productividad en el almacenaje y paletizado de estos productos. Así, el rendimiento placa/operario se ve incrementado, disponiendo de un mayor tiempo ocioso que puede ser destinado a otras tareas.
- Igualmente, vinculado a esta disminución en la densidad aparente final de los productos elaborados, se consigue mejorar la logística de distribución de estos productos. En este sentido, se ha comprobado que al introducir residuos de caucho de NFU, disminuye el consumo unitario de gasoil (litros/placa), lo que repercute en unas menores emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Por todo, en este trabajo se ha propuesto una alternativa a los tradicionales métodos de elaboración de prefabricados, apostando por la sostenibilidad y la revalorización de residuos. En lo que respecta a las limitaciones de este estudio, podríamos destacar la necesidad de realizar un análisis económico más en profundidad, así como evaluar el comportamiento de los paneles en sistemas constructivos reales. Por todo ello, se propone como futura línea de trabajo el uso de programas de simulación que permitan estimar el comportamiento de estas placas colocadas *in situ*, así como analizar distintas tipologías de soluciones constructivas.

**Agradecimientos:** los autores quieren agradecer la colaboración de la empresa SIGNUS Ecovalor, S.L., como suministrador principal de las materias primas empleadas en esta investigación. Así como al proyecto PAU23540910772 de la Universidad Politécnica de Madrid.

## REFERENCIAS

- Altamura, P.; Ceruti, F.; Viglia, S.; Beylot, A.; Cutaia, L. (2023). Environmental, social, and economic implications of critical raw materials' extraction from residues. *Mining and Processing Residues*, 219-274.
- 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*, vol. 15(16):5660.
- Álvarez, M.; Ferrández, D.; Zaragoza-Benzal, A.; Colorado-Pastor, B. (2024). Initiative to Increase the Circularity of HDPE Waste in the Construction Industry: A Physico-Mechanical Characterization of New Sustainable Gypsum Products. *Applied Sciences*, vol. 14, 478.
- Arshad, H.; Zayed, T. (2022). Critical influencing factors of supply chain management for modular integrated construction. *Automation in Construction*, vol. 144, 104612.
- 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 Union. *Science of the Total Environment*, vol. 908, 168295.
- Construnario. (2023). Placas de yeso. [En línea]. Disponible en: <https://www.construnario.com/notiweb/47445/placas-de-fibra-yeso-fermacell#> (último acceso 5 de septiembre de 2023).
- Castellón, F.J.; 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*, vol. 345, nº 72.
- Castro Sales, D.; Cabral, A.E.; Medeiros, M.S. (2021). Development of fiberboard panels manufactured from reclaimed cement bags. *Journal of Building Engineering*, vol. 34, 2021.
- Corinaldesi, V.; Donnini, J.; Nadinocchi, A. (2015). Lightweight plasters containing plastic waste for sustainable and energy-efficient building. *Construction and Building Materials*, vol. 94, pp. 337-345.
- Cortés, D.; Traxler, A.A. & Greiling, D. (2023). Sustainability reporting in the construction industry – Status quo and directions of future research. *Heliyon*, vol. 9, nº 11.
- Derakhshan, Z.; Taghi, M.; Hossein, A.; Oiveri, G.; Framarzian, M.; Mansooreh, D.; Ferrante, M. (2017). A new recycling technique for the waste tires reuse. *Enrionmental Research*, vol. 158, pp. 462-469.
- EN 13279-2:2014. Gypsum binders and gypsum plasters - Part 2: Test methods.
- 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*, vol. 17, 635.
- Forbes España, «El 93% de las pymes industriales sufre incrementos en sus costes de producción por la inflación, según Hiscox». [En línea]. Disponible en: <https://cutt.ly/MwC39zeu> (último acceso 23 de septiembre de 2023).
- Hand, X.; Cai, Q. (2024). Environmental regulation, green credit, and corporate environmental investment. *Innovation and Green Development*, vol. 3, no. 6, 100135.
- 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*, vol. 47, pp. 633-642.
- Li, B.; Chen, W.; Xu, C.; Hou, P. (2018). Impacts of government subsidies for environmental-friendly products in a dual-channel supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 171, 1558-1576.
- López-Zaldívar, Ó.; Lozano-Díez, R.; Herrero, S.; Mayor, 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*, vol. 150, pp. 558-567.
- Mordor Intelligence, «Industria de construcciones prefabricadas en España - Estudio - Crecimiento, tendencias, impacto de COVID-19 y previsiones (2024 - 2029)» [En línea]. Disponible en: <https://www.mordorintelligence.com/> (último acceso 23 de septiembre de 2023).
- Moschen-Schimek, J.; Kasper, T.; Huber-Humer, M. (2023). Critical review of the recovery rates of construction and demolition waste in the European Union – An analysis of influencing factors in selected EU countries. *Waste Management*, vol. 167, pp. 150-164.
- Placo Saint-Gobain. "Iberyola E-35 (Technical Information)". 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.placo.es/Producto/iberyolar#marketing-description> (último acceso 21 de Agosto de 2023).
- Pinto, N.; Fioriti, C.; Akasaki, J.; Acuncha, T.; Okimoto, F. (2020). Performance of plaster composites incorporating rubber tire particles. *Revista de la Construcción*, vol. 35, pp. 215-231.
- Reichlc, C.; Schatz, M. «Volume 38 World Mining Data 2023», 2023.
- Romero-Gómez, M.I.; Sivla, 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 Clenaer Production*, vol. 423, 139820.
- Santos, P.; Mateus, D.; Ferrández, D.; Verdú, A. (2022). Numerical Simulation and Experimental Validation of Thermal Break Strips' Improvement in Facade LSF Walls. *Energies*, vol. 15, 8169.
- Serna, Á.; del Río, M; Palomo, J.G.; González, M. (2013). Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres. *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 633-641.
- Shih, H.C.; Lai, Y.T.; Yang, H.Y.; Ma, H. (2024). Development of secondary material competition modelling for evaluation of incentive policies on plastic waste. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140195.
- Tafreshi, S.N.M.; Amiri, A.; Dawson, A.R. (2023). Sustainable

- use of End-of-Life-Tires (ELTs) in a vibration isolation system. *Construction and Building Materials*, vol. 405, 133316.
- Thomas, B.S.; Gupta, R, C. (2016). Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber. *Journal of Cleaner Production*, vol. 113, pp. 86-92.
- UNE 102042:2023. Gypsum plasters. Other test methods.
- UNE-EN 12859:2012. Gypsum blocks - Definitions, requirements and test methods.
- Wang, Z.; Hu, H.; Gong, J.; Ma, X.; Xiong, W. (2019). Precast supply chain management in off-site construction: A critical literature review. *Journal of Cleaner Production*, vol. 232, 1204-1217.
- Zakerzadeh, M.; Shahbodagh, B.; Ng, J.; Khalili, N. (2024). The use of waste tyre rubber in Stone Mastic Asphalt mixtures: A critical review. *Construction and Building Materials*, vol. 418, 135420.
- Zaragoza-Benzal, A.; Ferrández, D.; Diaz-Velilla, J.P.; Zúñiga-Vicente, J.A. (2023a). Manufacture and characterisation of a new lightweight plaster for application in wet rooms under circular economy criteria. *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19, e02380.
- Zaragoza-Benzal, A.; Ferrández, D.; Santos, P.; Morón, C. (2023b). Recovery of End-of-Life Tyres and Mineral Wool Waste: A Case Study with Gypsum Composite Materials Applying Circular Economy Criteria. *Materials*, vol. 16, nº 243.
- Zerin, N.H.; Rasul, M.G.; Jahirul, M.I.; Sayem, A.S.M. (2023). End-of-life tyre conversion to energy: A review on pyrolysis and activated carbon production processes and their challenges. *Science of the Total Environment*, vol. 905, 166981.



**Reconocimiento – NoComercial (by-nc):** Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.