

MEJORA DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN PARTICIONES LIGERAS DE ACERO MEDIANTE BANDAS DE ROTURA TÉRMICA ELABORADAS CON MATERIAL RECICLADO

D. Ferrández Vega¹, A. Zaragoza Benzal¹, A. Leal Matilla¹, P. Santos²

1. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

2. Universidad de Coimbra, Coimbra, Portugal

RESUMEN

El sector de la construcción es responsable de cerca del 36% del consumo energético global, lo que hace que esta industria genere entorno al 37% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI). En términos estadísticos, se ha constatado que entorno al 40% de la demanda energética de los edificios se invierte en tareas de calefacción y refrigeración de edificios. Por este motivo, el estudio de alternativas a los tradicionales sistemas constructivos, más eficientes térmicamente y con un uso responsable de los recursos durante su ejecución se ha establecido como una ruta crítica dentro del Pacto Verde Europeo.

En este sentido, este trabajo explora el potencial de las materias primas secundarias para conformar bandas de rotura de puente térmico que permitan mejorar la resistencia térmica de las particiones aligeradas de acero. Para ello, en primer lugar, se ha estudiado la conductividad térmica de tres bandas de rotura de puente térmico: (1) caucho aglomerado procedente de neumáticos fuera de uso (NFU), (2) mezclas aglomeradas de caucho de NFU y corcho, y (3) plástico reciclado. A continuación, se ha llevado a cabo el estudio del comportamiento térmico de diferentes particiones ligeras de acero, en las que se incorporan estos materiales como rotura de puente térmico, determinando la resistencia térmica final de los sistemas constructivos y realizando simulaciones mediante el software THERM. Finalmente, se ha llevado a cabo una discusión crítica de los resultados obtenidos y se han explorado las potenciales fuentes de ventaja competitiva de estos sistemas de construcción aligerada.

Los resultados obtenidos muestran que es posible emplear estos materiales de segunda vida para mejorar la eficiencia energética de las edificaciones y mitigar en gran medida el efecto de los puentes térmicos en las particiones ligeras de acero. La resistencia térmica de las particiones que emplearon bandas de rotura de puente térmico en ambas caras del paramento se incrementó en más del 10% en todos los casos analizados. Además, las bandas de rotura de puente térmico presentan otras ventajas, tales como bajo coste, facilidad de ejecución, alta capacidad de revalorización de residuos, elevada durabilidad y mejora del comportamiento acústico de las particiones, entre otras. Por todo ello, este estudio muestra una alternativa económica y técnicamente viable para incorporar materiales reciclados en los sistemas constructivos convencionales. Así, la investigación realizada constituye un trabajo de gran interés para los profesionales de la edificación y arquitectura técnica, generando un

marco de referencia para escoger entre las diferentes alternativas sostenibles que permiten mejorar el comportamiento térmico de las construcciones de acero aligeradas.

PALABRAS CLAVE: eficiencia energética, puentes térmicos, economía circular, particiones ligeras de acero, comportamiento térmico.

1. INTRODUCCIÓN

El gran consumo energético del sector de la construcción, combinado con el uso desmedido de materias primas no renovables, sitúa a la industria en el foco de una gran cantidad de medidas y acciones orientadas a aumentar su sostenibilidad [1]. No obstante, el consumo de recursos no se detiene tras la finalización de la etapa de construcción de nuestros edificios, sino que se extiende durante toda la etapa de uso del edificio mediante el consumo energético destinado a la climatización. Tan solo el consumo energético de calefacción representa el 64,4% del consumo total en edificios destinados a vivienda [2].

Esta gran demanda de energía ha fomentado el desarrollo de sistemas constructivos más eficientes e industrializados como los sistemas Light Steel Frame (LSF). Estos sistemas, destinados a constituir muros de fachada, medianeras o particiones interiores, constituyen una solución más flexible, ligera, de rápida ejecución y energéticamente eficiente en comparación con los sistemas tradicionales [3]. Además, estos sistemas contienen una menor energía embebida o incorporada durante su producción, al ser totalmente industrializados, y, por lo tanto, el consumo de recursos se optimiza al máximo [4].

Los sistemas LSF albergan multitud de ventajas desde el punto de vista de la sostenibilidad y la eficiencia energética y constructiva, no obstante, cuentan con un punto crítico: los puentes térmicos generados por la misma estructura del sistema. La estructura del LSF se compone de perfiles de acero conformados en frío, sobre los cuales se coloca el aislante térmico y se atornillan las placas o paneles del revestimiento final. Es sobre esta capa de acabado donde el puente térmico se hace evidente, lo que genera zonas en las que el flujo de calor es constante [5].

Para evitar estos puentes térmicos, se han estudiado diferentes alternativas, como el aumento de las capas de aislamiento térmico del sistema, la inclusión de perforaciones en los montantes o la modificación de la morfología de los perfiles para minimizar el contacto directo con las capas de acabado exteriores [6]-[8]. No obstante, la incorporación de bandas de rotura de puente térmico (TBS) en las alas de los montantes ha sido la solución más eficiente y prometedora. En este sentido, diversas investigaciones han analizado diferentes materiales para conformar estos TBS, como el PVC, el poliuretano de alta densidad e incluso el aerogel, y los resultados muestran una reducción significativa de la presencia del puente térmico (entre el 33 % y el 65 %) y un aumento importante de la eficiencia del sistema, basado en la conductividad térmica de dichos materiales [9]-[11].

Las ventajas de utilizar TBS aumentan al combinarla con criterios basados en la economía circular, lo que incrementa la sostenibilidad global del sistema. La reintroducción de residuos en la elaboración de materiales y sistemas constructivos como materiales secundarios permite, no solo seguir las directrices europeas actuales en materia de emisiones, eficiencia energética y recursos naturales, si no

también ser consecuentes con el hecho de que el sector de la construcción sea uno de los mayores generadores de residuos en la UE [12].

En esta investigación se han estudiado las propiedades térmicas de diferentes materiales reciclados para su uso como TBS en fachadas LSF: caucho reciclado de neumáticos fuera de uso, caucho y corcho reciclados y plástico reciclado. Asimismo, se ha realizado una evaluación de la influencia de estos TBS en el comportamiento térmico global de los sistemas que los incorporan mediante su análisis y comparación mediante simulaciones de elementos finitos. Y, por último, se han explorado las fuentes potenciales de ventaja competitiva de estos sistemas de construcción aligerada. La adopción de estas soluciones potencia la implementación de medidas circulares y sostenibles para abordar problemas existentes en la industria, convirtiendo un desecho en una solución constructiva, con alta eficiencia en el consumo de recursos tanto en su producción como en su utilización.

2. METODOLOGÍA

En este apartado se incluyen los materiales utilizados, así como el programa experimental llevado a cabo en esta investigación.

2.1. Materiales

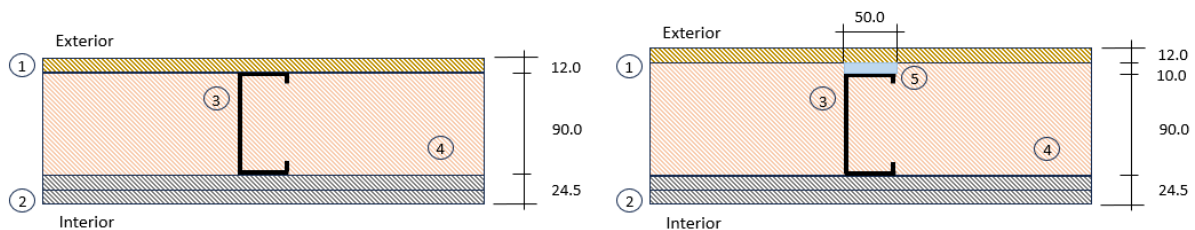
En este apartado se describen los materiales que componen los diferentes TBS utilizados, así como el muro LSF analizado. En todos los casos, las dimensiones de estas bandas han sido: espesor nominal de 10 mm, 50 mm de anchura. Los materiales usados han sido:

- Caucho reciclado (C): procedente de neumáticos fuera de uso (NFU), suministrado por la empresa Amorim (Portugal). Este material presenta una densidad de 955,30 kg/m³.
- Corcho y caucho reciclado (C+C): este material está compuesto por una mezcla de caucho reciclado de NFU y corcho al 50% en volumen. Este material presenta una densidad de 658,10 kg/m³, suministrado por la empresa Amorim (Portugal).
- Plástico reciclado (P): procedente de residuos industriales y urbanos, compuesto principalmente por polipropileno y polietileno de alta y baja densidad. Presenta una densidad de 922,60 kg/m³, fue suministrado por la empresa Extruplás (Portugal).

En la Tabla 1 se recogen los materiales que componen el muro LSF evaluado térmicamente, cuya sección constructiva se muestra en la Figura 1.

Tabla 1. Espesor y conductividad térmica de las capas que componen el muro LSF

	Panel de fibras orientadas (OSB)	Aislamiento de lana mineral	Perfil de acero	Panel de yeso laminado
Espesor (mm)	12.0	90.0	C90x43x15x1.5	12.5
λ (W/(m·K))	0.100	0.035	50.000	0.250
ρ (kg/m ³)	650	60	7860	608
Referencia	[13]	[14]	[15]	[16]



Leyenda:

1. Tablero de partículas orientadas (OSB) e = 12.0 mm;
2. Placa de yeso laminado e = 12.5 mm;
3. Perfil de acero C90x43x15x1.5 mm;
4. Lana mineral e = 90.0 mm;
5. Banda de rotura de Puente térmico (TBS) e = 10.0 mm

Figura 1. Sección constructiva del muro LSF analizado: **(a)** Muro de referencia, **(b)** muro con TBS.

2.2. Programa Experimental

El programa experimental incluye la determinación de la conductividad térmica de los TBS empleados, así como la de la resistencia térmica de los muros LSF con la incorporación de los TBS mediante simulaciones numéricas.

2.2.1. Análisis de la conductividad térmica de los TBS

La conductividad térmica de los TBS se determinó mediante el ensayo de la placa caliente, según la norma UNE-EN 12664 [17]. El equipo utilizado fue un λ -Meter EP500e (Lambda-Meßtechnik, Dresden). El ensayo se realizó en probetas de $15 \times 15 \times 3$ cm³ a 10 °C, 25 °C y 40 °C. El ensayo comenzó una vez alcanzado un régimen estacionario y finalizó tras 90 minutos para cada temperatura medida. El resultado final de conductividad corresponde al valor a 10 °C obtenido en la recta de regresión para la conductividad a las tres temperaturas (λ -10).

2.2.2. Evaluación del comportamiento térmico del muro LSF

Para evaluar el comportamiento térmico de los muros LSF, se realizaron simulaciones numéricas de elementos finitos en 2D con el software THERM. Se modelaron las secciones horizontales de los muros LSF según el detalle constructivo mostrado en la Figura 1. Las simulaciones se realizaron sobre un muro de referencia sin TBS y con cada uno de los TBS considerados: caucho reciclado, caucho reciclado +

corcho y plástico reciclado. El error máximo de la simulación se fijó en el 2% y el número máximo de iteraciones fue 100. Las condiciones de contorno a considerar en el modelo fueron la temperatura del aire a ambos lados del muro y la resistencia térmica superficial (R_s). Para las temperaturas del aire se consideró un escenario de invierno, con una temperatura exterior de 5 °C y una temperatura interior de 22 °C. Para la resistencia térmica superficial del muro se tomaron los valores indicados en el Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Eficiencia Energética (CTE BD-HE/1 [18]), de 0.04 m²·K/W para el lado exterior (R_{se}) y de 0.13 m²·K/W para la superficie interior (R_{si}).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en la caracterización térmica de los TBS evaluados, mediante la determinación de su conductividad térmica de manera individual, y a través de la resistencia térmica de los muros LSF que los incorporan como TBS.

3.1. Análisis de la conductividad térmica de los TBS

La Figura 2 muestra los resultados obtenidos para la conductividad térmica de los TBS analizados. El autor/autores debe redactar las primeras evidencias parciales de acuerdo a los resultados obtenidos, además de indicar y describir los posibles puntos atípicos o relaciones llamativas obtenidas tras realizar el estudio.

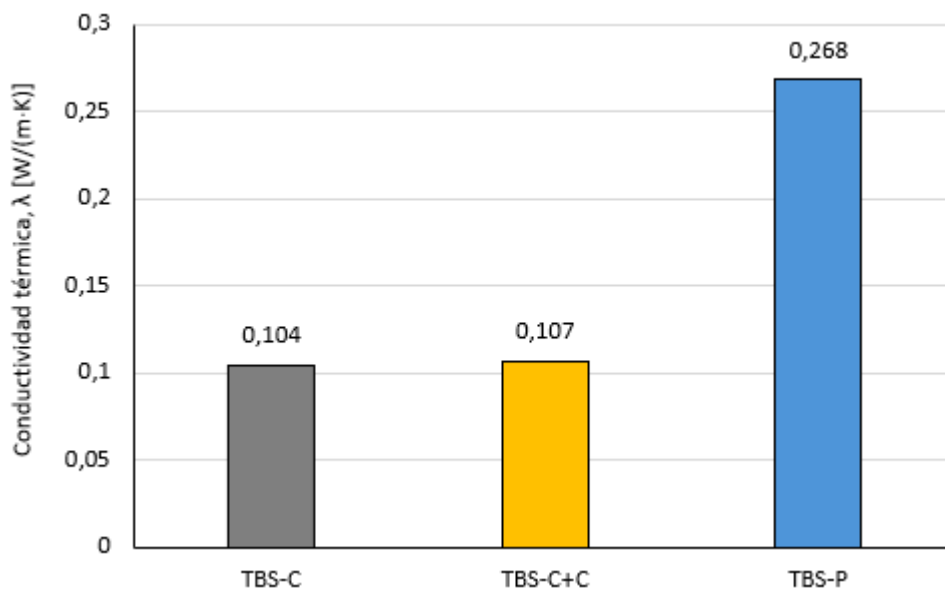


Figura 2. Resultados de la conductividad térmica de los diferentes TBS evaluados.

En la Figura 2 se observa como el material de caucho reciclado (TBS-C) presenta la conductividad térmica más baja de entre todos los materiales analizados, con una conductividad térmica de 0,104 W/(m·K). Con valores muy cercanos a estos se encuentra el material compuesto por una mezcla de corcho y caucho (TBS-C+C), con 0.107 W/(m·K). En este caso, la adición del corcho repercute en un ligero aumento de la conductividad, aunque tan solo del 2.9%. Las conductividades térmicas de estos materiales reciclados son similares a las que presentan otros materiales de construcción de recursos naturales vírgenes, como la madera de coníferas.

En cuanto al material de plástico reciclado (TBS-P), fue el que presentó la mayor conductividad térmica de entre todos los materiales analizados, con 0,268 W/(m·K). Los valores de TBS-P superaron al material de caucho reciclado y a la mezcla de caucho y corcho en más de un 150%. Muchos investigadores resaltan la relación existente entre la densidad aparente de los materiales y su conductividad térmica [19] (X). No obstante, los resultados obtenidos ponen de manifiesto como la densidad de los materiales no siempre representa una clara correlación con su conductividad térmica, ya que, en este caso, mientras que el caucho reciclado fue el material que obtuvo valores más bajos de conductividad térmica, fue también el material con la mayor densidad aparente. Los resultados obtenidos para la conductividad térmica resaltan el gran potencial de ciertos materiales descartados por la industria como un recurso valioso desde el punto de vista de la sostenibilidad en edificación.

3.2. Evaluación del comportamiento térmico del muro LSF

A continuación, la Figura 3 recoge los resultados para la resistencia térmica de los muros LSF con los diferentes TBS evaluados.

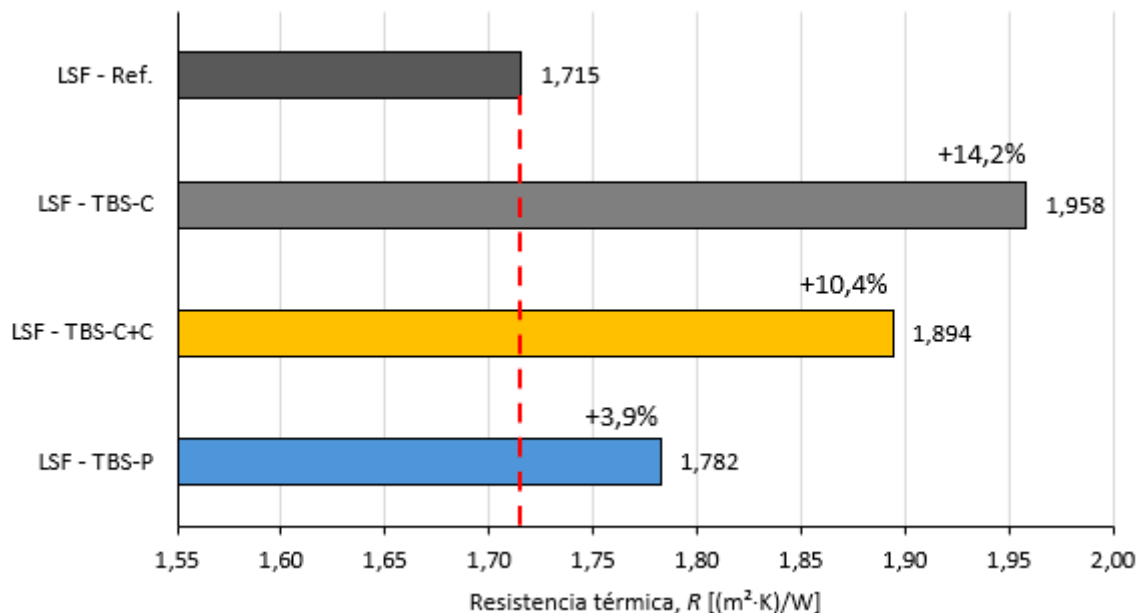


Figura 3. Resultados de la resistencia térmica de los muros LSF con los distintos TBS analizados.

En la Figura 3 se observa como todos los muros que incorporan TBS aumentaron considerablemente su resistencia térmica, limitando de manera clara el flujo de calor entre el interior y el exterior. La resistencia térmica del muro de referencia (sin TBS) simulado alcanza 1,715 (m²·K)/W, un valor que se alinea con resultados obtenidos en investigaciones experimentales con este tipo de muros [20]. Al incorporar el TBS de caucho, la resistencia aumentó hasta 1,958 (m²·K)/W, lo que supone un aumento del 14,2% con respecto a la referencia. La utilización del TBS-C+C produjo un aumento algo menor, hasta 1,894 (m²·K)/W, lo que representa una mejora del 10,4% en relación con el muro convencional. Por último, el TBS-P presentó el aumento más moderado de esta propiedad, con una resistencia térmica de 1,782 (m²·K)/W, lo que supone un aumento de tan solo el 3,9%. Si bien estos resultados son muy prometedores, aún no alcanzan los valores reportados por otros investigadores al utilizar

materiales vírgenes. Larbi et al. emplearon TBS a partir de PVC, obteniendo reducciones del puente térmico de hasta el 65% [21], mientras que Santos y Ribeiro consiguieron disminuciones de la resistencia térmica en muros LSF de hasta el 19% con láminas de aluminio de baja emisividad [9].

A continuación, la Figura 4 muestra la distribución de temperaturas interiores de todos los muros simulados.

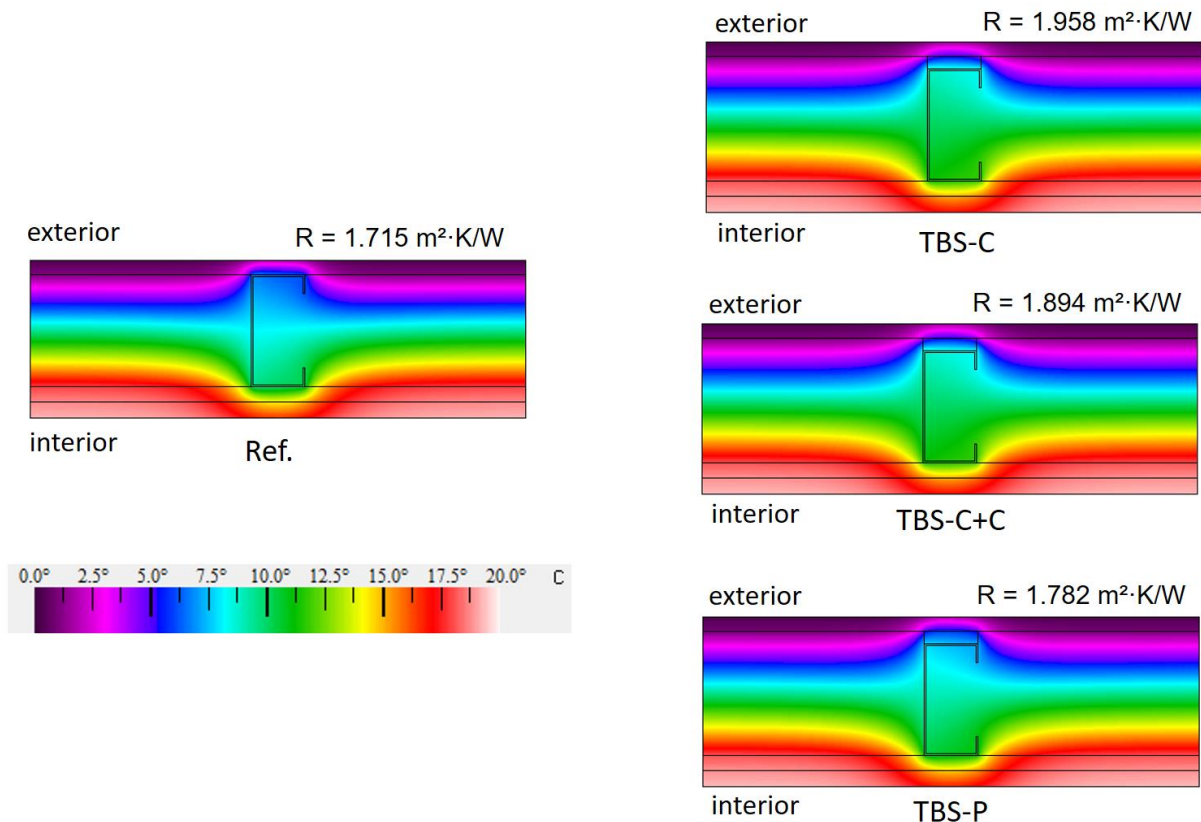


Figura 4. Distribución de temperaturas internas en los muros LSF analizados.

En la Figura 4 podemos observar como, en términos generales, al incorporar el TBS, las temperaturas más frías se alejan del perfil de acero de la estructura del muro, limitando así la pérdida de calor en ese punto y el consecuente puente térmico. El TBS también controla y reduce el gradiente de bajas temperaturas que se crean hacia el lado exterior del muro, por lo que aumenta la temperatura en torno al perfil de acero. Este comportamiento es mucho más significativo en el muro con el TBS-C y TBS-C+C, mientras que en el muro con TBS-P, las temperaturas en el centro del muro bajan en torno a 2 °C, en línea con investigaciones previas con materiales secundarios [22]. Los resultados indican que la implementación de estos TBS, particularmente el TBS-C, optimiza el desempeño energético en sistemas constructivos donde los puentes térmicos suelen comprometer el aislamiento global.

4. CONCLUSIONES

Esta investigación evalúa el desempeño térmico de diversos TBS fabricados con materiales reciclados, propuestos como solución para mitigar los puentes térmicos en sistemas LSF. Tras los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El material de caucho reciclado procedente de NFU presentó la conductividad térmica más baja, seguido por el material combinado de caucho y corcho y por el plástico reciclado. Este último representa la opción analizada, con una conductividad térmica un 150% mayor que la de las opciones con caucho reciclado.
- Todos los muros que incorporaron TBS al lado exterior del perfil de acero de la estructura presentaron un aumento significativo de la resistencia térmica global.
- El muro con TBS de caucho reciclado presentó la resistencia térmica más alta, con un 14,2% superior a la del muro de referencia, seguido del muro con TBS de caucho y corcho, con un 10,4%, y, por último, el muro con TBS de plástico reciclado, con un aumento del 3,9% con respecto a la referencia.
- La distribución interna de las temperaturas del muro experimentó variaciones significativas al incorporar los TBS, lo que limitó el flujo de calor hacia el exterior y aumentó la temperatura interna global del muro.

Como futuras investigaciones en relación con este estudio se plantea la evaluación de otros tipos de TBS elaborados a partir de materiales reciclados de diferente naturaleza, así como el análisis del comportamiento higrotérmico en el interior de los muros que incorporan los TBS.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] European Commission, "Communication from the commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, REPowerEU Plan. 2022."
- [2] Eurostat, "Energy consumption in households. Statistics Explained." Accessed: Sep. 29, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households
- [3] V. Tavares, N. Soares, N. Raposo, P. Marques, and F. Freire, "Prefabricated versus conventional construction: Comparing life-cycle impacts of alternative structural materials," *Journal of Building Engineering*, vol. 41, p. 102705, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jobee.2021.102705.
- [4] P. Santos, C. Martins, and L. Simões da Silva, "Thermal performance of lightweight steel-framed construction systems," *Metallurgical Research & Technology*, vol. 111, no. 6, pp. 329–338, Sep. 2014, doi: 10.1051/metal/2014035.
- [5] M. Manzan, A. Pezzi, and E. Zandegiacomo De Zorzi, "Analysis of the coupled effect of steel studs and surface emissivity on internal insulation systems performance," *Energy Build.*, vol. 204, p. 109520, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109520.
- [6] P. Santos and K. Poologanathan, "The Importance of Stud Flanges Size and Shape on the Thermal Performance of Lightweight Steel Framed Walls," *Sustainability*, vol. 13, no. 7, p. 3970, Apr. 2021, doi: 10.3390/su13073970.
- [7] D. R. Kapoor and K. D. Peterman, "Quantification and prediction of the thermal performance of cold-formed steel wall assemblies," *Structures*, vol. 30, pp. 305–315, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2020.12.060.
- [8] L. M. Lupan, D. L. Manea, and L. M. Moga, "Improving Thermal Performance of the Wall Panels Using Slotted Steel Stud Framing," *Procedia Technology*, vol. 22, pp. 351–357, 2016, doi: 10.1016/j.protcy.2016.01.108.
- [9] P. Santos and T. Ribeiro, "Thermal Performance Improvement of Double-Pane Lightweight Steel Framed Walls Using Thermal Break Strips and Reflective Foils," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 21, p. 6927, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14216927.

- [10] D. Tkalčić, B. Milovanović, M. Gaši, M. Jelčić Rukavina, and I. Banjad Pečur, "Optimization of Thermal Bridges Effect of Composite Lightweight Panels with Integrated Steel Load-Bearing Structure," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 18, p. 6474, Sep. 2023, doi: 10.3390/en16186474.
- [11] J. Andersons, M. Kirpluks, P. Cabulis, K. Kalnins, and U. Cabulis, "Bio-based rigid high-density polyurethane foams as a structural thermal break material," *Constr. Build. Mater.*, vol. 260, p. 120471, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120471.
- [12] European Parliament, "How the EU wants to achieve a circular economy by 2050," 2024.
- [13] "SWISS KRONO." Accessed: Feb. 22, 2026. [Online]. Available: <https://www.swisskrono.com/>
- [14] "Volcalis - Isolamentos minerais, S.A." Accessed: Jan. 22, 2026. [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://volcalis.pt/documentos/FichaTecnica_Volcalis_AlphaRolo.pdf
- [15] C. Santos and L. Matias, "ITE50—Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios," 2006, *Lisbon*.
- [16] "Placo Saint-Gobain." Accessed: Feb. 22, 2026. [Online]. Available: <https://www.placo.es/>
- [17] European Committee for Standardization, "EN 12664:2001. Thermal performance of building materials and products — Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods — Dry and moist products of medium and low thermal resistance," 2001.
- [18] Gobierno de España, "Código Técnico de la Edificación (CTE). Documento Básico HE: Ahorro de energía. HE1: Condiciones para el control de la demanda energética. Ministerio de Fomento.," 2019.
- [19] L. Lima, A. Zaragoza-Benzal, D. Ferrández, and P. Santos, "Eco-Gypsum Panels with Recycled Fishing NET Fibers for Sustainable Construction: Development and Characterization," *Materials*, vol. 18, no. 18, Sep. 2025, doi: 10.3390/ma18184305.
- [20] P. Santos and D. Mateus, "Experimental assessment of thermal break strips performance in load-bearing and non-load-bearing LSF walls," *Journal of Building Engineering*, vol. 32, p. 101693, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jobee.2020.101693.
- [21] A. Ben Larbi, M. Couchaux, and A. Bouchair, "Thermal and mechanical analysis of thermal break with end-plate for attached steel structures," *Eng. Struct.*, vol. 131, pp. 362–379, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.10.049.
- [22] A. Zaragoza-Benzal, D. Ferrández, P. Santos, and E. Atanes-Sánchez, "Upcycling EPS waste and mineral wool to produce new lightweight gypsum composites with improved thermal performance," *Constr. Build. Mater.*, vol. 449, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138464.