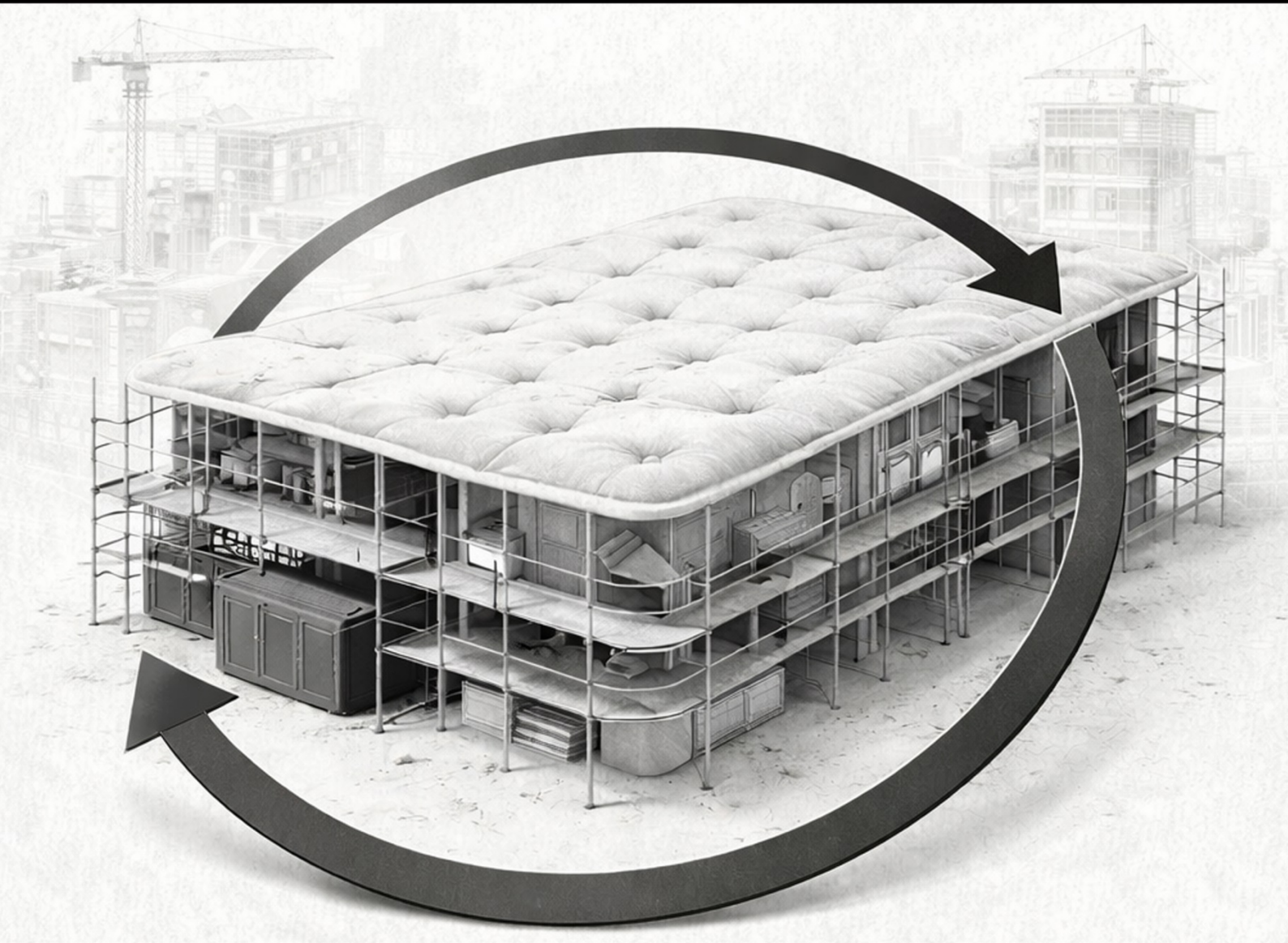


CONSTRUCCIÓN CIRCULAR



NUEVOS CAMINOS PARA EL RECICLAJE Y LA REUTILIZACIÓN EN ARQUITECTURA

Universidad de Valladolid
Ayuntamiento de Valladolid

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto de investigación piloto “Valorización de colchones usados como material de construcción” (2024-2025), en el contexto del proyecto europeo *Circular Ecosystems* (ref. 0035_CIRCULAR_ECOSYSTEMS_6_E), cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Interreg VI-A España-Portugal (POCTEP) 2021-2027. El piloto ha sido promovido por el Ayuntamiento de Valladolid en colaboración con la Fundación Universidad de Valladolid, y forma parte de las acciones demostrativas de soluciones sistémicas para la transición hacia la economía circular y la prevención de la contaminación en el ámbito urbano.



The information and opinion contained in the chapters are solely those of the individual authors and do not necessarily reflect those of the editors. Therefore, we exclude any claims against the author for the damage caused by use of any kind of the information provided herein, whether incorrect or incomplete. The editors does not claim any responsibility for any type of injury to persons or entities resulting from any ideas referred to in the chapters. The sole responsibility to obtain the necessary permission to reproduce any copyright material from other sources lies with the authors. The editors cannot be held responsible for any copyright violation by the authors in their chapters. Any material created and published by Restbuilt Group is protected by copyright held exclusively by Resbuilt. Any reproduction or utilization of such material and texts in other electronic, or printed publications is explicitly subjected to prior approval by the referred group.

En conformidad con la política editorial de la Universidad de Valladolid (<http://publicaciones.uva.es>), todos los capítulos de este libro han superado una evaluación externa por pares ciegos (double-blind peer review) realizada por un comité internacional de expertos académicos y artísticos.

Esta publicación es parte del proyecto de investigación:

“Valorización de colchones usados como material de construcción” ref. 0035_CIRCULAR_ECOSYSTEMS_6_E (2024-2025), financiado por UE/FEDER/Interreg VI-A España-Portugal (POCTEP) 2021-2027, en colaboración con Ayuntamiento de Valladolid y Fundación UVa.

© De los textos: los autores, 2025

© De las ilustraciones: los autores y las fuentes citadas

Diseño: Javier Arias Madero

Cubierta: Iker Díaz González

ARIAS, J.; DIAZ,I. (eds.) (2025): Construcción circular: Nuevos caminos para el reciclaje y la reutilización en arquitectura. Universidad de Valladolid (Grupo Restbuilt)

EDITORES:

Javier Arias Madero

Iker Díaz González

Grupo RESTBUILT

Universidad de Valladolid

Valladolid, 2025

ISBN: 978-84-09-84517-0

Organiza:

Proyecto de Investigación de la Universidad de Valladolid

RETBUILT: Reciclaje de colchones como materiales de construcción en arquitectura

Proyecto de investigación piloto “Valorización de colchones usados como material de construcción”

Ref. 0035_CIRCULAR_ECOSYSTEMS_6_E, 2024-2025,

financiado por UE/FEDER/Interreg VI-A España-Portugal (POCTEP), en colaboración con el Ayuntamiento de Valladolid y la Fundación Universidad de Valladolid.

Comité editorial:

Javier Arias. Universidad de Valladolid

Iker Díaz. Universidad de Valladolid

Autores de los capítulos:

María Cristina Moreno Fernandez/ Universidad Politécnica de Madrid, ETSAM

Antonio Domínguez Delgado/ Universidad de Sevilla, ETSAS

Carlos Antonio Domínguez-Torres/ Universidad de Sevilla, ETSAS

Marina Iguaz Ramos/ Universidad Politécnica de Madrid, ETSAM

Beatriz Arranz Arranz/ Universidad Politécnica de Madrid, ETSAM

Helena Domínguez Torres/ Universidad de Sevilla, ETSAS

Antonio Pío Bauzá Laorden/ Universidad CEU San Pablo

Carmen Galán Martín/ Universidad de Sevilla, ETSAS

Adriano Jiménez-Guerrero/ Universidad de Sevilla, ETSAS

Mar Barbero Barrera/ Universidad Politécnica de Madrid, ETSAM

Sofía Melero Tur/ Universidad CEU San Pablo

José Pérez Fenoy / Centro Tecnológico de la Cerámica, F.Innovarcilla

Carlos Alberto Rivera-Gómez / Universidad de Sevilla, ETSAS

Álvaro Moral García/ Universidad de Valladolid, ETSAVA

Daniel González García/ Universidad de Valladolid, ETSAVA

Alejandra Jiménez López/ Universidad de Sevilla, ETSAS

Tomás García García/ Universidad de Sevilla, ETSAS

Jesús Díez Vázquez/ Fundación del Patrimonio Natural de Castilla y León

Lara Pelaz Pérez/ Fundación del Patrimonio Natural de Castilla y León

Javier Alejo Hernández-Ayllón/ Universidad de Valladolid, ETSAVA

Susana Constanza Sepúlveda-General/ Universidad de Talca

Laura del Pino Noriega/ Kean University

Rosa Luz Bellido Pla/ Universidad de Valladolid, ETSAVA

Juan Jerónimo Olcese Ortega/ Fundación Rehabitar

Félix Jové-Sandoval / Universidad de Valladolid, ETSAVA

Eva García-Baños / Universidad de Valladolid, ETSAVA

Mar Barbero-Barrera / Universidad Politécnica de Madrid, ETSAM

Javier Arias Madero / Universidad de Valladolid, ETSAVA

Iker Díaz González / Universidad de Valladolid, ETSAVA

CONSTRUCCIÓN CIRCULAR:

NUEVOS CAMINOS PARA EL RECICLAJE Y LA
REUTILIZACIÓN EN ARQUITECTURA

ÍNDICE

1.Pueblos con futuro: Estrategia de revitalización con lógica circular	9
2.Evaluación de estrategias de rehabilitación de viviendas sociales en el sur de Europa mediante el empleo de materiales textiles reciclados, considerando los desafíos y efectos asociados al cambio climático.	19
3.Análisis del potencial mitigador de recubrimientos fríos y baldosas de cemento con PET incorporado para afrontar las olas de calor en la vivienda social del sur de España	27
4.El diseño para el desmontaje de sistemas constructivos de CLT	35
5.Rehabilitación de cubiertas de viviendas sociales en clima mediterráneo mediante baldosas fabricadas con PET incorporado: Análisis de ciclo de vida económico y energético	53
6.Materiales de segunda vida: Reutilización de residuos industriales en arquitectura	63
7.Cerámica Circular: Fabricación aditiva con residuos vegetales y minerales	71
8.Casa dentro de una casa o como habitar una cochiguera	79
9.Silencios habitables: Hacia una economía circular de la escucha.....	89
10.SMILE CITY: Materiales sostenibles para aplicaciones innovadoras de bajas emisiones en la ciudad circular.....	101
11. El caso de la Escuela de Arquitectura de Talca en Chile.....	107
12.CO-NET.Reutilizar para habitar.....	115
13.Circularidad en la arquitectura de tierra. Estudios de caso de reúso del material.....	125
14.Paneles de fibras naturales recicladas. Nuevos materiales a partir de excedentes vegetales	133
15.De residuo voluminoso a recurso constructivo. Reciclaje de colchones para arquitectura circular.....	141

Pueblos con futuro: Estrategia de revitalización con lógica circular

Villages with a Future: A Revitalization strategy based on circular logic..

MARÍA CRISTINA MORENO FERNANDEZ/ Universidad Politécnica de Madrid

Palabras clave Keywords

Sanabria, revitalización, estrategia, espacios de comunidad, economía circular.

Sanabria, revitalisation, strategy, community spaces, circular economy.

Resumen

El fenómeno de la “España vaciada” evidencia el profundo impacto de la despoblación en las zonas rurales españolas, especialmente en regiones como Castilla y León, Extremadura o Aragón. La pérdida continuada de habitantes ha generado un notable deterioro económico, social y cultural, visible en comarcas como Sanabria (Zamora), donde la falta de oportunidades contrasta con la riqueza natural y patrimonial del entorno. Ante esta realidad, se propone una estrategia integral de revitalización rural basada en la recuperación, rehabilitación y puesta en valor de edificaciones tradicionales y espacios públicos abandonados de los pueblos, con el propósito de transformarlos en auténticos motores de desarrollo sostenible. La propuesta se fundamenta en los principios de la economía circular, la utilización de materiales naturales y la alineación con los objetivos de sostenibilidad de la Unión Europea. Como caso práctico, se presenta la rehabilitación de la antigua escuela de San Justo de Sanabria, concebida como un espacio multifuncional destinado a fomentar la innovación, el encuentro comunitario y el arraigo territorial, ofreciendo así una alternativa frente al abandono rural de nuestro país.

Abstract

The phenomenon of ‘España vaciada’ highlights the profound impact of depopulation in rural areas of Spain, especially in regions such as Castilla y León, Extremadura and Aragon. The continued loss of inhabitants has led to significant economic, social and cultural decline, visible in areas such as Sanabria (Zamora), where the lack of opportunities contrasts with the natural and cultural wealth of the environment. In view of this reality, a comprehensive rural revitalisation strategy is proposed, based on the recovery, rehabilitation and enhancement of traditional buildings and abandoned public spaces in villages, with the aim of transforming them into genuine drivers of sustainable development. The proposal is based on the principles of the circular economy, the use of natural materials and alignment with the European Union's sustainability objectives. As a case study, we present the rehabilitation of the old school in San Justo de Sanabria, conceived as a multifunctional space designed to promote innovation, community gathering and territorial roots, thus offering an alternative to rural abandonment in our country.

Introducción

Cuando nos alejamos de las grandes ciudades y nos comenzamos a adentrar en aquellos lugares que parecen haber sido borrados del mapa de nuestro país, es cuando realmente tomamos conciencia del profundo impacto que está generando el fenómeno conocido como la "España vaciada"; este hace referencia a la gran ola de migración por parte de la población rural hacia las ciudades de nuestro país, cuyo origen se encuentra en la década de los sesenta.

Dicho fenómeno va dejando las huellas a su paso, como la despoblación y el envejecimiento de las zonas rurales, acompañado por el abandono de las infraestructuras y el patrimonio, lo que ha generado una fuerte desigualdad entre el medio urbano y rural de nuestro país.

Por ello, el desarrollo de este proyecto tiene como objetivo elaborar una estrategia que permita revitalizar las regiones rurales españolas, fomentando el retorno de población y promoviendo la sostenibilidad y el desarrollo local.

La estrategia de revitalización

La estrategia de revitalización parte de un proceso de análisis integral que tiene como objetivo recopilar la mayor cantidad de información posible sobre las regiones afectadas por el fenómeno de la "España vaciada". Este proceso resulta fundamental para entender en profundidad la realidad de cada territorio y diseñar intervenciones ajustadas a sus necesidades concretas. La recopilación de información se puede llevar a cabo mediante diversas metodologías, que pueden utilizarse de forma independiente o combinada para lograr una visión más completa. Entre las principales herramientas destacan:

- La observación directa, visitando y recorriendo el territorio para identificar visualmente los signos de despoblación, abandono o deterioro, así como posibles oportunidades latentes.
- El contacto directo con la población local (Fig.1.), a través de conversaciones informales, entrevistas o cuestionarios, que permiten captar percepciones, necesidades y propuestas desde la voz de quienes habitan o están vinculados emocionalmente al lugar.



Figura 1. Contacto directo con la población. Fuente propia.

- El uso de fuentes externas, como estudios previos, artículos de prensa, informes institucionales o bases de datos demográficas, que complementan la visión local con un marco más amplio y contextualizado.

El análisis de toda esta información no solo permite identificar los problemas concretos que afectan a cada zona, sino también detectar fortalezas ocultas o recursos desaprovechados que podrían formar parte de la solución. A partir de este profundo diagnóstico, se plantea no solo una estrategia abstracta, sino una intervención concreta sobre espacios físicos que sean propios y representativos de cada región. La idea es recuperar construcciones ya existentes como: antiguas escuelas, almacenes, centros vecinales o cualquier edificio en desuso con valor simbólico o funcional, para convertirlos en núcleos de actividad comunitaria.

Etapas de desarrollo de la estrategia

Una vez definida en que consiste la estrategia, procedemos a mencionar las diferentes etapas para llevarla a cabo:

- ETAPA 1: Identificar las necesidades
La necesidad alude a una situación de carencia o escasez de un elemento cuya incorporación en un entorno o en la vida de una persona u objeto resulta esencial para alcanzar un determinado nivel de bienestar. Este análisis de necesidades permitirá comprender en mayor profundidad tanto los requerimientos de las personas como los del entorno, con el fin de ofrecer una respuesta lo más precisa posible a cada necesidad y reflejarla en el futuro proyecto de desarrollo.
- ETAPA 2: Identificar espacios de comunidad
Tras el análisis y la comprensión de las necesidades planteadas en el apartado anterior, surge la idea de que los espacios comunitarios o de convivencia pueden ser una solución clave para abordar muchos de los desafíos mencionados, destacando especialmente la lucha contra la soledad que afecta a la población rural, en particular a las personas mayores.

Por ello, los espacios comunitarios deberían ser infraestructuras de carácter público, gestionadas o cedidas por el ayuntamiento, que promuevan la participación social y dinamicen la vida en el entorno rural. Estos lugares podrían acoger actividades diversas o simplemente servir como punto de encuentro para la conversación, adaptándose a los distintos momentos del día y las estaciones del año. Lo ideal sería que fueran espacios inclusivos, diseñados para personas de todas las edades y géneros, fomentando la creación de vínculos intergeneracionales que, a su vez, podrían contribuir a cubrir otras necesidades del entorno rural.
- ETAPA 3: Economía circular
La recuperación de las edificaciones para generar los espacios mencionados en el punto anterior se plantea siguiendo, en la medida de lo posible, los principios de la economía circular, es decir, revalorizando los productos, materiales y recursos empleados en el ámbito de la construcción, para mantenerlos durante el mayor tiempo posible en el ciclo productivo. De esta manera, se reduce la generación de residuos y se contribuye a alcanzar los objetivos de sostenibilidad establecidos por la Unión Europea para 2050. Este modelo tiene como objetivo desvincularse del modelo constructivo lineal tradicional basado en “tomar-fabricar-consumir-eliminar”.
- ETAPA 4: Análisis de viabilidad
Una vez definido el proceso estratégico orientado a la revitalización de las regiones rurales afectadas por la despoblación, el siguiente paso es evaluar la viabilidad real de llevar a cabo dicha estrategia. No se trata solo de tener una buena idea sobre el papel, sino de analizar con detalle si su aplicación práctica es posible, sostenible y replicable en distintos contextos rurales.

Sanabria como lugar de aplicación

La comarca de Sanabria se ubica al noroeste de la provincia de Zamora, quedando delimitada por tres zonas: León, Ourense y Portugal (Fig.1.). La región es conocida fundamentalmente por la Villa de Puebla de Sanabria, la cual se puede considerar la capital de la comarca dado que es el núcleo urbano principal; y el Lago de Sanabria, lago glacial más grande de la Península Ibérica rodeado de un gran entorno natural protegido, por sus especies de flora y fauna. Estos lugares son los puntos fuertes de la comarca, ya que son los que generan el atractivo turístico de la zona.

Sin embargo, estos puntos fuertes se ven contrarrestados por la fuerte despoblación que asume la zona desde las últimas décadas, esto está generando que las oportunidades de vida en los diferentes pueblos de la comarca cada vez sean más complicadas por la escasez de servicios básicos, como la educación o la sanidad, la ausencia de empleo para la gente joven o el abandono de la población residente allí.

La comarca zamorana cuenta con un total de 5604 habitantes, según el Instituto Nacional de Estadística (INE) de 2021. Esta población queda dividida en 15 municipios o ayuntamientos, los cuales a su vez albergan varias pedanías, pueblos o aldeas.

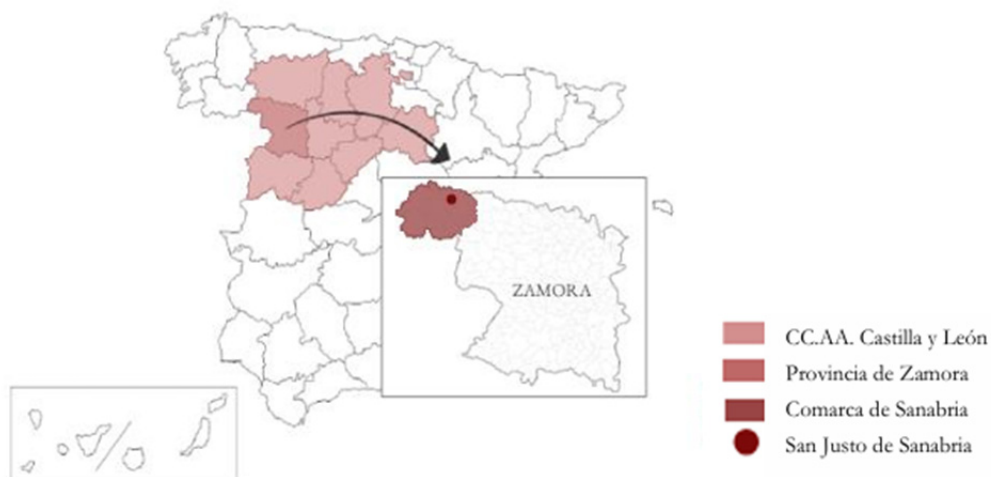


Figura 2. Ubicación de Sanabria sobre el mapa. Elaboración propia.

Una vez ubicados sobre el lugar, se procede a aplicar las diferentes etapas de la estrategia para la comarca de Sanabria.

ETAPA 1: Identificación de las necesidades de Sanabria

Se identifican tres tipos de necesidades en el entorno sanabrés: las propias del pueblo como espacio físico y comunitario, las de sus habitantes en términos sociales y personales, y las condicionadas por el clima y la estacionalidad.

- Necesidades de los pueblos:
La información recopilada por la observación directa, las conversaciones con personas del entorno, fuentes documentales de artículos de prensa y el propio conocimiento acerca del lugar nos permite conocer con mayor precisión las necesidades de estas zonas, pudiendo mencionar en el caso de Sanabria: la gran cantidad de construcciones abandonadas, la mala gestión del campo o el consumo energético poco eficiente.
- Necesidades de los ciudadanos:
Con los datos recopilados mediante entrevistas y cuestionarios dirigidos a personas residentes o con algún vínculo con la zona, es posible conocer dichas necesidades sobre la comarca. Entre las que podemos destacar que las personas menores de 35 años tienen una conectividad limitada para querer estudiar o teletrabajar o que las personas mayores de 65 años tienen falta de asistencia a domicilio y de centros de día.
- Necesidades climatológicas:
Mediante el software informático *Climate Consultant 6.0* es posible obtener una carta bioclimática detallada de la zona zamorana, junto con un diagrama de Givoni, a partir del cual se identifican cuatro estrategias de diseño pasivo orientadas a alcanzar el máximo confort en las construcciones: protección solar en ventanas, enfriamiento evaporativo, ganancias de calor interno y ganancias de radiación solar pasiva.

ETAPA 2: Identificación de los espacios de comunidad en los pueblos

Llevando el concepto de “espacio de comunidad” a la comarca de Sanabria, se plantea la posibilidad de aprovechar las numerosas construcciones abandonadas que son propiedad del ayuntamiento y, por tanto, de carácter público. Esto facilitaría la puesta en marcha del proyecto, especialmente en términos de financiación.

Para que el proyecto sea social y económicamente viable, es fundamental tener en cuenta la realidad demográfica de la zona en la que nos encontramos, marcada por una fuerte despoblación y donde la mayoría de sus pueblos no alcanzan siquiera los 50 habitantes. Por esta razón, en lugar de crear un espacio comunitario en cada localidad, ya que sería algo difícil de sostener, se propone establecer estos espacios en puntos estratégicos, ubicados en pueblos que puedan prestar servicio a las localidades cercanas. La distribución de estos centros comunitarios podría organizarse en distintos niveles, considerando factores como la población de cada pueblo, la distancia entre ellos o la organización municipal a la que pertenecen.

Además, al fomentar el uso compartido de estos espacios entre varios pueblos, es crucial pensar en los medios de transporte. En algunos casos, el desplazamiento podrá hacerse a pie o en vehículo privado, pero en otros será necesario implementar alternativas como el transporte compartido, por ejemplo, autobuses. Esta opción no solo garantizaría que el acceso sea equitativo para todos, teniendo en cuenta que no todas las personas disponen de medios propios, sino que también abriría la puerta a la creación de nuevas oportunidades laborales en la zona.

A continuación, se presenta un mapa (Fig.3.) que ilustra cómo se organizará la compartición de estos espacios comunitarios, agrupando los pueblos según los criterios mencionados:

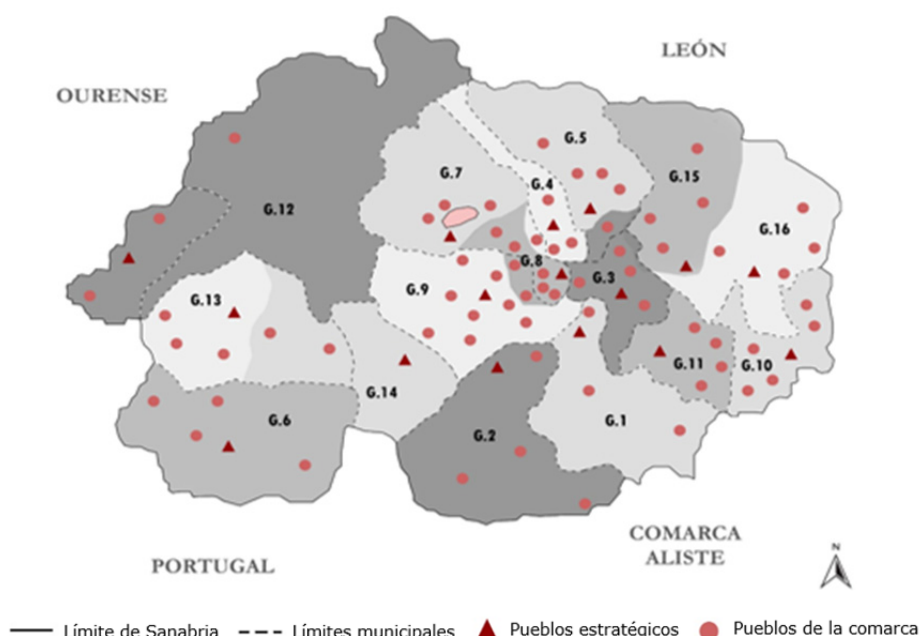


Figura 3. Agrupación de pueblos por espacios de comunidad. Elaboración propia.

ETAPA 3: La economía circular en la propuesta

La línea de proyecto planteada arranca con un prototipo inicial ubicado en uno de los pueblos de la comarca: San Justo de Sanabria. Esta localidad ha sido seleccionada estratégicamente debido al profundo conocimiento que se tiene sobre ella y a la existencia de una edificación pública en desuso. Además de su valor histórico y simbólico para la comunidad, el edificio reúne las condiciones adecuadas para ser rehabilitado y convertido en un espacio comunitario multifuncional. El edificio elegido es la antigua escuela del pueblo (Fig.4.), una construcción datada de principios del siglo XX que se levanta sobre cuatro muros de piedra, los cuales actúan tanto como elemento estructural como de cerramiento.

En el año 2008, ya se inició un intento de rehabilitación de la escuela. Se logró avanzar en la estructura interior, consolidando el forjado de primera planta y de cubierta, las escaleras y los pilares de soporte. Sin embargo, el proyecto quedó sin concluir por razones burocráticas y administrativas, dejando el edificio en un estado intermedio: con la envoltura exterior bien conservada, pero con el interior a medio construir.



Figura 4. Vista exterior e interior de la escuela de San Justo. Fuente propia.

La idea es que el espacio no solo beneficie a los habitantes de San Justo, sino que funcione como punto de encuentro para sus cuatro pueblos vecinos. Generando el punto de partida para reactivar la vida comunitaria en la comarca, promoviendo la colaboración entre pueblos, la integración intergeneracional y la creación de nuevas oportunidades sociales, culturales y laborales.

Para llevar a cabo la rehabilitación de esta construcción se emplearán los principios de la economía circular. En primer lugar, se identificarán las partes a rehabilitar, construir e instalar, donde clasificaremos cada uno de los elementos en 5 grupos: cubierta, solado, revestimiento interior, carpinterías y acabados.

En segundo lugar, se planteará una solución concreta, respetando los sistemas estéticos y constructivos de la zona, lo que permite definir los materiales a emplear:

- Grupo 1. Cubierta:
Se plantea una solución constructiva basada en una estructura de madera acompañada, por rastreles y tejas de pizarra.
- Grupo 2. Solera y acabado del suelo:
La idea es realizar una solera mediante áridos reciclados y tierra compactada, rematada con un pavimento de baldosas de barro cocido.
- Grupo 3. Revestimiento interior:
La propuesta consiste en aislar el muro de piedra, por su cara interior, con paneles de corcho y finalmente revestirlo con un acabado de barro.
- Grupo 4. Carpinterías:
Las carpinterías de las puertas y ventanas se recuperarán de otras edificaciones y se ajustarán al proyecto.
- Grupo 5. Acabados:
Se reciclarán, reutilizarán y recuperarán los materiales necesarios para la ejecución de los acabados, tales como: barandillas de escalera, tabiquería, mobiliario, ...

Finalmente localizamos sobre el mapa los materiales correspondientes a cada sistema, intentando obtenerlos de las zonas más próximas, reduciendo así las distancias de transporte y contribuyendo a disminuir los impactos ambientales. Se trabaja en tres escalas:

- Escala municipal de San Justo de Sanabria (Fig.5.):
En este primer nivel podemos obtener materiales como la lana de oveja (aislamiento) o las tejas de pizarra (revestimiento de la cubierta).



Figura 5. Localización a escala del municipio de San Justo. Elaboración propia.

- Escala provincial de Zamora (Fig.6.):
En este segundo nivel podemos optar a materiales como las baldosas de barro (acabado del suelo) o la madera (la estructura de la cubierta)



Figura 6. Localización a escala de la provincia de Zamora. Elaboración propia.

- Escala de comunidades próximas o país colindante (Fig.7.):
Hay que recurrir a este nivel para conseguir los materiales más complejos de encontrar, donde habrá que trasladarse hasta Portugal para obtener placas de corcho que actúen como aislante, a León para conseguir áridos reciclados o a Madrid para conseguir la recuperación de carpinterías tanto de puertas como de ventanas.

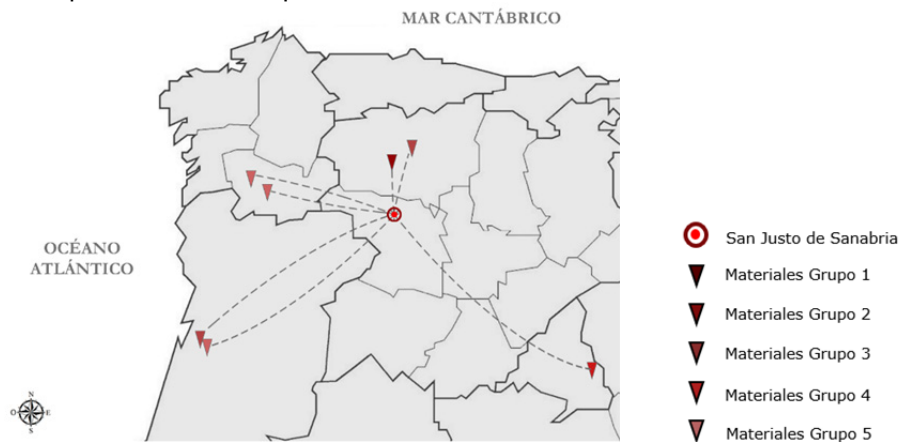
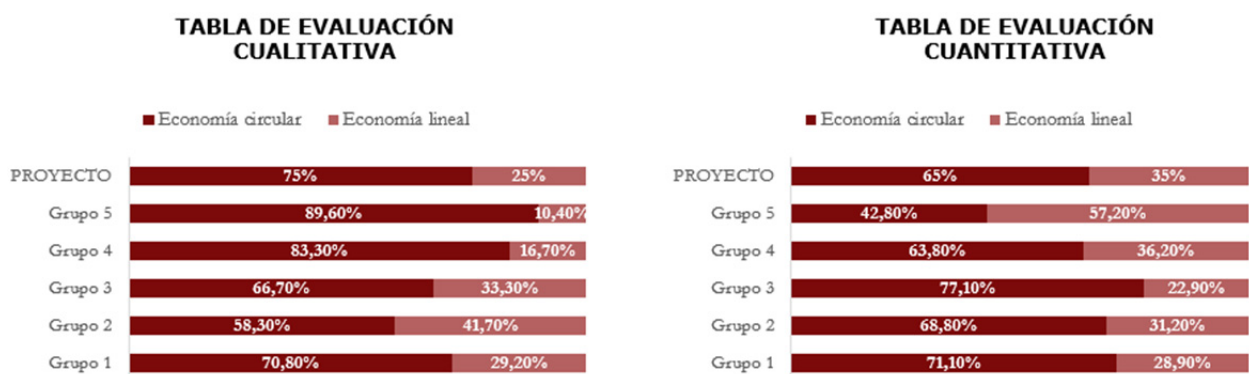


Figura 7. Localización a escala comunidades próximas o país colindante. Elaboración propia.

Una vez identificados los elementos sobre los que hay que intervenir para llevar a cabo la rehabilitación, se plantea evaluar cada material de forma individual, así como el conjunto total. Esta evaluación permitirá conocer qué porcentaje del proyecto responde a los criterios de economía circular y valorar si existen oportunidades para incrementarlo.

Se proponen dos tipos de evaluación para analizar los materiales: por un lado, una de enfoque cualitativo, que se apoya en criterios y valores asignados de manera más subjetiva, permitiendo valorar aspectos perceptivos o contextuales de los materiales; y por otro, una evaluación de enfoque cuantitativo, fundamentada en parámetros objetivos según los criterios establecidos en la Guía Verde de Edificios 2022.

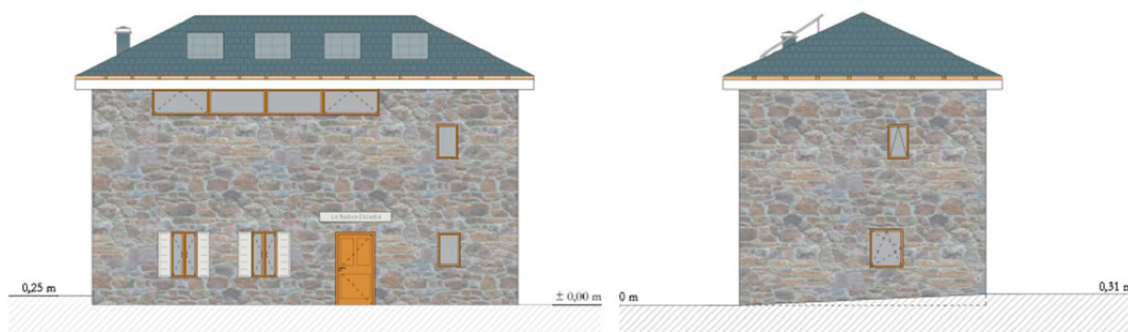
Con la información obtenida a partir de las evaluaciones, representada en los siguientes gráficos (Fig.8.), se puede observar que todo el proceso seguido en la recuperación del edificio de la escuela, tanto en



materiales como en los sistemas de construcción, es bastante elevado, siguiendo un 70% los principios economía circular.

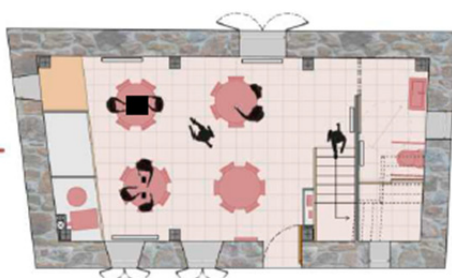
Figura 8. Gráficas de resultados finales de ambas evaluaciones. Elaboración propia.

Aunque algunos materiales son de nuevo uso, el objetivo es extender su ciclo de vida más allá de su instalación en este edificio. Además, se emplean otros materiales como la tierra y el barro con tratamientos mínimos, como la compactación o el humedecimiento, lo que permite su posible recuperación y reutilización sin alterar sus propiedades originales.



Finalmente, el resultado de la propuesta de rehabilitación de la antigua escuela de San Justo se muestra en los siguientes dibujos de alzados (Fig.9.) y plantas (Fig.10).

Figura
propia.



9. Diseño de la propuesta en alzado. Elaboración



Figura 10. Diseño de la propuesta en planta. Elaboración propia.

ETAPA 4: Análisis de viabilidad de la propuesta

El análisis se centra en dos aspectos clave: el laboral y el económico. Ambos permiten valorar si este modelo pudiera funcionar como motor de desarrollo para otras zonas rurales del país y si tiene potencial para generar un impacto real y duradero.

- Viabilidad laboral:

Una vez definida la estrategia y enfocado el proyecto al pueblo de San Justo de Sanabria, se podrán plantear los posibles usos del edificio y, a partir de ello, identificar los puestos de trabajo que podrían generarse si el proyecto se materializara. Esto abriría nuevas oportunidades laborales tanto para los habitantes de Sanabria como para posibles nuevos residentes, contribuyendo así a frenar la despoblación y fomentar una pequeña repoblación. Entre los puestos destacan: un conductor encargado de transportar a las personas entre los diferentes pueblos, varios monitores responsables de las actividades, tanto estáticas como dinámicas, y los distintos talleres; así como una persona que se encargue del mantenimiento, cuidado y gestión de la edificación.

Si el proyecto se lleva adelante, se generarían inicialmente cinco puestos de trabajo directos. A ellos se sumarían quienes teletrabajen desde el edificio y los auxiliares encargados del cuidado de personas mayores.

- Viabilidad económica:

Se trata de una estimación parcial orientada principalmente a calcular el coste de la intervención de manera general, considerando tanto el precio de los materiales necesarios como la mano de obra implicada. Se obtiene así una cuantía de presupuesto de ejecución material (PEM) de 40.103,80 €, que, al añadir gastos e impuestos correspondientes, asciende aproximadamente a 58.000,00 €.

Una vez previsto el coste económico del proyecto de rehabilitación de la escuela de San Justo de Sanabria, se contemplan varias subvenciones como posibles fuentes de financiación para su ejecución. Aunque algunas de estas ayudas ya han expirado, se incluyen como referencia por su adecuación a la naturaleza del proyecto, y las cuales podrían servir de modelo ante futuras convocatorias similares. Entre ellas destacan el programa DUS 5000, el programa PREE 5000 del IDAE o Programa de Ayuda a las Actuaciones de Rehabilitación a Nivel de Edificio, promovido por la Junta de Castilla y León.

Reflexión final

El desarrollo de la estrategia de revitalización no requiere una gran cantidad de datos técnicos o teóricos, sino información específica y cercana, obtenida mediante la observación directa y el diálogo con los habitantes de las zonas afectadas. Son ellos quienes mejor comprenden la naturaleza de los problemas y pueden aportar una visión auténtica y útil para plantear soluciones ajustadas a la realidad cotidiana del medio rural.

Aunque el proyecto se centra en la comarca de Sanabria, su planteamiento posee un carácter flexible y adaptable, lo que permite aplicarlo a otras regiones rurales de España e incluso a contextos internacionales con problemáticas similares. La recuperación de espacios en desuso dentro de los pueblos demuestra que acciones sencillas pueden generar grandes impactos sociales, económicos y demográficos, revitalizando a la población local y atrayendo nuevos residentes.

Para que estas iniciativas trasciendan el ámbito teórico, resulta indispensable el compromiso de las administraciones públicas y el reconocimiento del potencial de los entornos rurales. Asimismo, es necesario asumir una mayor conciencia sobre el impacto medioambiental de la construcción, incorporando principios de sostenibilidad y economía circular en los proyectos, con el fin de promover un desarrollo más equilibrado y responsable.

Agradecimientos

Después de siete años de carrera en Arquitectura, me llena de alegría que lo que en un principio fue mi Trabajo de Fin de Grado haya llegado a ser la ponencia en un congreso. Quiero compartirlo con especial cariño con mis familiares y amigos, que me han acompañado y apoyado a lo largo de este camino. También deseo dedicar unas palabras a mi querido pueblo, San Justo de Sanabria, que me acogió desde chiquitina y que, a pesar de no tener un lazo de sangre con él, me ha llevado a sentirme una sanabresa más.

Por último, quiero agradecer a mi tutora de la ETSAM, Beatriz, por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto sobre el mundo rural, en el que había pensado durante años y que, gracias a su guía, he podido hacer realidad.

Referencias

Aldecoa, C. (2025, 17 marzo). La Escuela de los Pueblos: cómo formar promotores de vida a través trabajo en comunidad en la España olvidada. *ElDiario.es*. https://www.eldiario.es/castilla-y-leon/sociedad/escuela-pueblos-formar-promotores-vida-traves-trabajo-comunidad-espana-olvidada_1_12133716.html

Báez Mezquita, J.M. (1994). *Arquitectura popular de Sanabria. Asentamientos, morfologías y tipologías rurales*. Instituto de Estudios Zamoranos Florián de Ocampo

Dinamización Rural. (2020, 11 mayo). El mundo rural y la innovación social se dan la mano en los “Laboratorios Rurales” en España. *Red PAC*. <https://redpac.es/noticia/el-mundo-rural-y-la-innovacion-social-se-dan-la-mano-en-los-laboratorios-rurales-en-espana>

Green Building Council España. (2024). *Verdes Edificios 2022. Guía de evaluación*. (RVE03). <https://gbce.es/recursos/verde-2022-rev03-guia-de-evaluacion/>

Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s. f.). 130 *Medidas ante el Reto Demográfico*. <https://www.miteco.gob.es/es/reto-demografico/temas/medidas-reto-demografico.html>

Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s. f.). *Economía circular*. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular.html>

Parlamento Europeo. *Economía circular: definición, importancia y beneficios* (s. f.) <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios#:~:text=La%20econom%C3%ADa%20circular%20es%20un,para%20crear%20un%20valor%20a%C3%B1adido.>

Voces de la España Vaciada. (2021, 31 agosto). *Documental - Voces de la España vaciada* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=ofzQ5MN_FWs

Evaluación de estrategias de rehabilitación de viviendas sociales en el sur de Europa mediante el empleo de materiales textiles reciclados, considerando los desafíos y efectos asociados al cambio climático.

Evaluation of retrofitting strategies for social housing in Southern Europe through the use of recycled textile materials, taking into account the challenges and impacts associated with climate change.

ANTONIO DOMÍNGUEZ DELGADO/ Universidad de Sevilla

CARLOS A.DOMÍNGUEZ TORRES/ Universidad de Sevilla

Palabras clave Keywords

Reciclaje de material textil, rehabilitación energética de vivienda, cambio climático, ahorro energético.

Recycled textile material, climate change, energy saving.

Resumen

Este trabajo analiza el impacto energético y ambiental de la aplicación de materiales textiles reciclados en la rehabilitación energética de un caso tipo de vivienda social construida a mediados del siglo XX en el sur de España. Este análisis cuantifica, por un lado, el consumo energético requerido para alcanzar condiciones de confort térmico interior en un horizonte temporal que abarca desde la actualidad hasta finales de siglo, empleando para ello proyecciones climáticas y herramientas de simulación energética. Por otro lado, se completa el estudio con un análisis de ciclo de vida orientado a determinar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la intervención con materiales textiles reciclados.

La investigación desarrollada pone de manifiesto una reducción significativa del consumo energético derivada del uso de materiales textiles reciclados como aislamiento en la rehabilitación del caso de estudio, en comparación con el caso base sin intervención. Asimismo, los resultados del análisis de ciclo de vida permiten concluir que la aplicación de estos materiales genera un efecto positivo en términos de reducción de gases de efecto invernadero, especialmente durante la fase operativa del edificio, lo cual compensa ampliamente las emisiones asociadas a la producción y puesta en obra de los materiales reciclados empleados.

Abstract

This work analyzes the energy and environmental impact of applying recycled textile materials in the energy retrofitting of a typical social housing unit built in the mid-20th century in southern Spain. This analysis quantifies, on the one hand, the energy consumption required to achieve indoor thermal comfort conditions over a time horizon spanning from the present to the end of the century, using climate projections and energy simulation tools. On the other hand, the study is complemented with a life cycle assessment (LCA) aimed at determining the greenhouse gas emissions associated with the intervention using recycled textile materials.

The research shows a significant reduction in energy consumption resulting from the use of recycled textile materials as insulation in the retrofitting of the case study, compared to the baseline case without intervention. Likewise, the results of the life cycle assessment allow concluding that the application of these materials produces a positive effect in terms of reducing greenhouse gas emissions, especially during the building's operational phase, which largely offsets the emissions associated with the production and installation of the recycled materials used.

Introducción

El cambio climático es ya una realidad evidente que está afectando con dureza a determinadas regiones del planeta. Junio de 2025 ha sido el mes de junio más cálido registrado en toda la serie histórica en España desde 1961, batiendo el récord de temperatura media y situándose como el mes con la mayor anomalía térmica jamás registrada en dicha serie. Por otro lado, el IPCC, en su cuarto informe, proyecta un incremento de temperaturas hacia finales de siglo de aproximadamente 4 °C para el sur de Europa y las regiones mediterráneas, acompañado de olas de calor más frecuentes y prolongadas en el tiempo.

Ante este escenario, resulta imprescindible reducir al máximo las emisiones de gases de efecto invernadero al tiempo que se dotan de recursos eficaces a la población para protegerla frente a los efectos adversos del cambio climático. Se impone así un enfoque de doble vía: reducción de emisiones y protección activa de la población frente al calentamiento global.

En lo que respecta a la reducción de las emisiones en este trabajo se explora una doble vía:

- Disminución del uso de materia prima virgen para su uso en la construcción mediante el reciclado y reutilización de materiales desechados procedentes de diversos orígenes, por ejemplo, residuos textiles.
- Reducción del consumo energético en las viviendas vía mejora de las condiciones de eficiencia energética.

En este trabajo nos centramos específicamente en el uso de residuos textiles reciclados para su utilización en construcción. A este respecto cabe señalar que según datos de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) en su informe *Circularity of the EU textiles value chain in numbers* (2025), la tasa de recogida separada de residuos textiles fue de menos del 15 % en la UE-27, lo que significa que aproximadamente el 85 % sigue yendo a residuos mixtos dificultando o impidiendo directamente ser reciclado o reutilizado.

En base a lo anterior, cualquier aplicación o uso que se le pueda dar a los residuos textiles contribuye a disminuir el impacto ambiental de su vertido al medio ambiente. En este sentido el uso de residuos de origen textil en construcción, además de contribuir a la disminución de vertidos de los mismos, contribuye a la disminución del uso de materia prima virgen lo que en definitiva se traduce en una reducción del impacto medioambiental de la actividad del sector de la construcción y una potenciación de la economía circular.

Por otro lado, se explora la reducción del consumo energético en las viviendas vía mejora de las condiciones de eficiencia energética usando material textil reciclado teniendo en cuenta que

- Los materiales fabricados con residuos textiles han mostrado sus buenas propiedades para su uso como materiales de aislamiento térmico y acústico. Numerosas empresas fabrican productos para su uso en construcción con buenas propiedades y con la ventaja de no usar apenas productos químicos, salvo tratamientos ignífugos.
- El uso de estos materiales en rehabilitación de viviendas obsoletas energéticamente, como la vivienda social construida en España a mediados del siglo pasado contribuye de forma significativa a reducir el consumo energético operacional y por tanto la emisión de gases de efecto invernadero.

Este trabajo analiza el impacto energético y ambiental de la aplicación de materiales textiles reciclados en la rehabilitación energética de un caso tipo de vivienda social construida a mediados del siglo XX en el sur de España. Este análisis cuantifica, por un lado, el consumo energético requerido para alcanzar condiciones de confort térmico interior en un horizonte temporal que abarca desde la actualidad hasta finales de siglo, empleando para ello proyecciones climáticas y herramientas de simulación energética. Por otro lado, se completa el estudio con un análisis de ciclo de vida orientado a determinar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la intervención con materiales textiles reciclados..

En la actualidad, el reciclaje de residuos textiles en Europa sigue siendo limitado, a pesar de los esfuerzos por fomentar la economía circular en el sector. Según datos de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), apenas un 15 % de los residuos textiles generados en la Unión Europea se recoge de forma separada para su reutilización o reciclaje, mientras que el resto termina mezclado con otros residuos y, en su mayoría, se incinera o se deposita en vertederos. De la fracción que sí se recupera, alrededor del 4,9 % se recicla para producir nuevos materiales, y solo un 1,7 % se reutiliza directamente en la región. Más preocupante aún es que el reciclaje textil a textil, es decir, la transformación de fibras usadas en nuevas fibras para confeccionar ropa, que apenas alcanza el 1%, debido a barreras tecnológicas y a la complejidad de los tejidos mezclados. Estos datos reflejan la urgente necesidad de

mejorar los sistemas de recogida selectiva, invertir en innovación tecnológica para el reciclaje y promover modelos de consumo más sostenibles que alarguen la vida útil de las prendas.

La investigación desarrollada pone de manifiesto una reducción significativa del consumo energético derivada del uso de materiales textiles reciclados como aislamiento en la rehabilitación del caso de estudio, en comparación con el caso base sin intervención. Asimismo, los resultados del análisis de ciclo de vida permiten concluir que la aplicación de estos materiales genera un efecto positivo en términos de reducción de gases de efecto invernadero, especialmente durante la fase operativa del edificio, lo cual compensa ampliamente las emisiones asociadas a la producción y puesta en obra de los materiales reciclados empleados.

Además, una comparación con un aislamiento convencional como el poliestireno expandido (EPS) permite afirmar la clara ventaja del uso de material textil reciclado en términos de emisiones, alcanzando rendimientos energéticos similares con un impacto ambiental sensiblemente inferior.

Con base en los resultados obtenidos, esta investigación permite avanzar en dos direcciones clave: la reducción del consumo energético necesario para garantizar el confort térmico interior —con los consecuentes beneficios sociales y ambientales— y la reducción del impacto ecológico a través del aprovechamiento de residuos textiles, cuya gran mayoría acabaría en vertederos o en el entorno natural, ya sea por deposición directa o por incineración no controlada con la consiguiente emisión de gases contaminantes.

En conjunto, estos esfuerzos refuerzan el modelo de economía circular, impulsan la transición hacia industrias más sostenibles y desempeñan un papel fundamental en la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Objetivos

Los objetivos que se pretenden alcanzar en esta investigación son:

- Evaluar a la luz del cambio climático el posible ahorro en el consumo energético para conseguir confort interior derivado de la rehabilitación, usando material textil reciclado en el aislamiento de la envolvente, de un caso arquetípico de vivienda social construida en el sur de España a mediados del siglo pasado.
- Analizar, para el periodo de tiempo desde la actualidad hasta fin de siglo y usando proyecciones de cambio climático, la huella de carbono que se deriva del uso de la rehabilitación propuesta frente a otros métodos de rehabilitación basados en materiales como EPS y frente al propio caso de referencia señalado de una vivienda arquetípica representante de la vivienda social.

Metodología

Caso de estudio

Como caso de estudio se considera un caso de vivienda social en la ciudad de Sevilla construida en la década de 1960, representante arquetípica de este tipo de viviendas construidas en el Sur de España a mediados del siglo pasado. Estas viviendas se caracterizan por tener un aislamiento térmico deficiente y obsoleto, lo que las hace muy vulnerables a las condiciones climáticas. La vivienda bajo estudio está situada en la tercera planta y para su análisis es considerada como una zona única. Su superficie total es de 68 m², Figura 1.



Figura 1. Izqda.: Vivienda caso estudio. Dcha: Vista aerea del barrio de El Plantinar.

Propuesta de rehabilitación con material textil reciclado

La propuesta de rehabilitación que se plantea en el presente trabajo se basa en el uso de un material procedente del reciclado textil elegido entre los que se comercializan en España para mejorar el aislamiento de la envolvente de la vivienda analizada. El material que se utiliza en el presente trabajo tiene las siguientes características según fabricante:

- Composición: 80% fibra de algodón reciclado, 20 % otras fibras textiles, además de resinas recicladas.
- Conductividad Térmica: $0.032 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- Densidad: 60 kg/m^3
- Calor específico: $1330 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ (estimado a partir de su composición).

El grosor considerado aquí es de 5 cm entre los distintos grosores que ofrece el fabricante que van desde 4 hasta 8 cm. La solución de rehabilitación que se propone es el añadido de un trasdosado interior como se aprecia en la Figura 2. Esta solución tiene la ventaja de ser fácilmente aplicable con un bajo impacto estructural y un coste económico moderado.

Rehabilitación con XPS

De forma adicional se analiza el uso de un material típico para rehabilitación de la envolvente térmica disponible en el mercado. El material que se utiliza en el presente trabajo tiene las siguientes características según fabricante:

- Composición: XPS (poliestireno extruido).
- Conductividad Térmica: $0.032 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- Densidad: 30 kg/m^3
- Calor específico: $1470 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ (estimado a partir de su composición).

El grosor considerado aquí es de 5cm. Esta solución igual que en el caso del uso de aislante con textil reciclado tiene la ventaja de ser fácilmente aplicable con un bajo impacto estructural y un coste económico moderado.

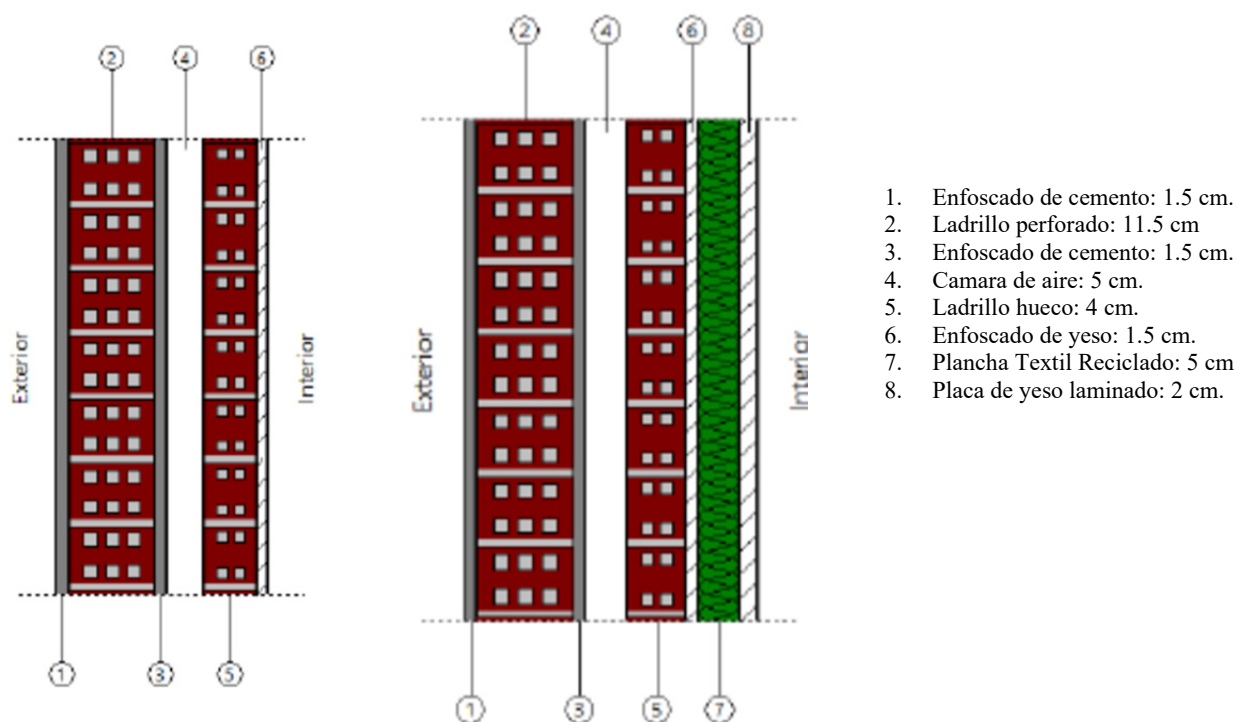


Figura 2. Secciones constructivas. Izqda: Caso de Referencia. Dcha: Caso Rehabilitado.

Clima actual y proyecciones de cambio climático

Clima actual.

Según datos de la Agencia Estatal de Meteorología española, Sevilla tiene una temperatura media anual de 19,2 °C. Durante los meses de julio y agosto, las temperaturas máximas medias pueden alcanzar los 40 °C, mientras que en enero las mínimas medias bajan hasta los 5,7 °C. Por lo tanto, los inviernos son relativamente suaves, mientras que los veranos son notablemente calurosos y secos, con altos niveles de insolación. El valor medio diario máximo de radiación solar incidente normal se produce en julio, con 8,3 kWh/m², y el mínimo medio se registra en diciembre, con 2,3 kWh/m². El clima de la región se clasifica como mediterráneo Csa según la clasificación climática de Köppen-Geiger.

Proyecciones de cambio climático

Para el estudio se ha efectuado la generación de los ficheros climáticos para Sevilla correspondientes a los años 2050 y 2080. Para ello se considera el escenario A2, altas emisiones hasta fin de siglo, definidos por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en su cuarto informe de evaluación.

La generación de las proyecciones climáticas para 2050 y 2080 se efectuó usando el programa CCWorldWeatherGen desarrollado por la universidad de Southampton (Reino Unido).

Análisis energético

El análisis energético se basa en los siguientes puntos:

- La variable analizada es la carga térmica horaria para cada día de cada año considerado.
- La zona interior de la vivienda se consideró como zona test única (Saafi, 2018). La temperatura del aire interior se modeló como un valor único.
- Se consideró una ventilación natural de 1 renovación de aire por hora si las temperaturas del aire exterior son adecuadas.
- Se considera una tasa de infiltración de 0,3 renovaciones de aire por hora, según investigaciones previas centradas en viviendas sociales en el sur de España.
- El edificio se modeló utilizando Energy Plus.

- Se calcularon las cargas térmicas para el caso de referencia inicial, para el caso de implementación de la medida de rehabilitación usando material textil reciclado y para el caso de implementación de la medida de rehabilitación usando XPS.

Resultados

Resultados energéticos

En la Figura 3 se presentan las cargas totales para calefacción y refrigeración para el periodo desde 2020 hasta 2080. Se puede observar a partir de dicha figura que:

- No hay prácticamente diferencia entre el caso con reciclado textil y con reciclado XPS como consecuencia de sus propiedades térmicas semejantes.
- El caso de referencia muestra una carga total de 12.69 GJ/m², lo que es superior en un 23% a las cargas de los casos reciclados que están en torno a 9.78 GJ/m².
- Los resultados obtenidos permiten por tanto establecer las buenas propiedades del material textil usado para la rehabilitación energética de la vivienda social considerada.

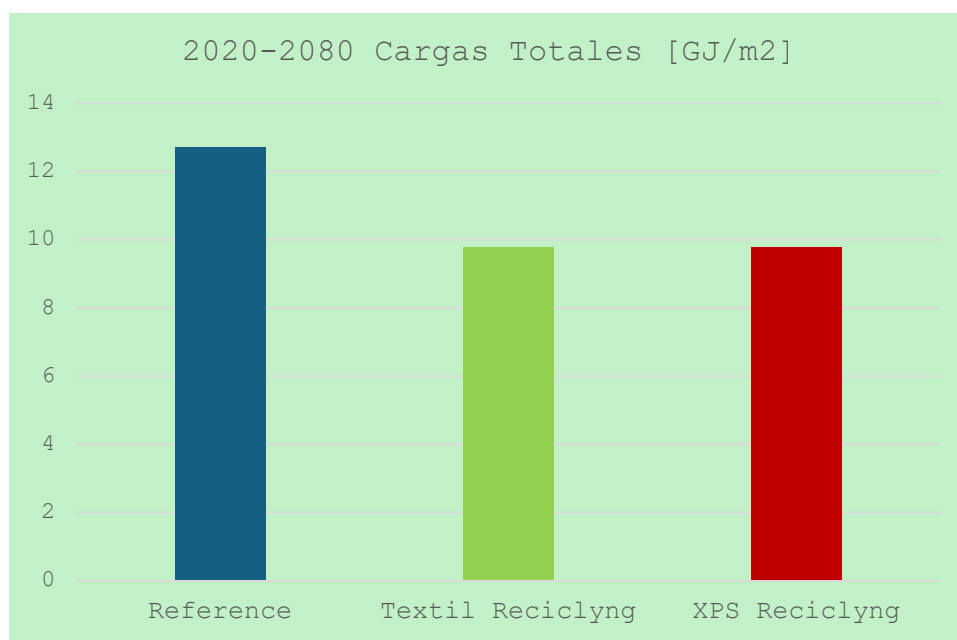


Figura 3. Cargas totales para el periodo 2020-2080 para los casos considerados.

Resultados del análisis de ciclo de vida: emisiones de CO₂.

En lo referente al análisis de ciclo de vida se presentan, por razones de espacio, solamente las emisiones de CO₂ para cada uno de los casos analizados.

A efectos comparativos, dichas emisiones incorporan las emisiones de CO₂ producidas para obtener confort interior y debidas al consumo energético descrito anteriormente.

Así a efectos comparativos tenemos:

- Vivienda de referencia: solo incorporamos las emisiones de CO₂ debido al consumo de energía utilizada para confort interior.
- Vivienda rehabilitada con Textil Reciclado y vivienda rehabilitada con XPS. Para ambos casos incluye (siguiendo la norma EN 15804)
 - Etapa de producción: extracción de materias primas y fabricación (Módulos A1, A2 y A3).
 - Etapa de construcción: transporte e instalación (Módulos A4 y A5).
 - Etapa de utilización (Modulo B).

- Etapa de Fin de Vida Útil.
- Beneficios y cargas más allá de las fronteras del sistema.
- Asimismo, se incluyen en estos casos las emisiones de CO₂ debido al consumo de energía utilizada para confort interior.

Para el material textil reciclado y el XPS se han tomado los datos proporcionados por los fabricantes en la Declaración Ambiental del Producto (DAP). Dichos valores se se presentan en la Tabla 1.

ETAPAS	AISLANTE CON TEXTIL	AISLANTE CON XPS
PRODUCCIÓN	0.666	4.6
CONSTRUCCIÓN	0.19	0.19
UTILIZACIÓN	0	0
FIN DE VIDA ÚTIL	0.0085	0.289
BENEFICIOS Y CARGAS POSTERIORES A LA VIDA ÚTIL	0	0
TOTAL EMISIONES Kg CO₂-eq/m²	0.8645	5.079

Tabla 1. Emisiones en Kg CO₂-eq/m² de producto.

CASO de ESTUDIO	EMISIONES DEBIDAS AL AISLANTE	EMISIONES POR CONSUMO ENERGÉTICO	EMISIONES TOTALES
REFERENCIA	0	19467.004	19467.004
REHABILITADA CON TEXTIL	62.244	14999.556	15061.80
REHABILITADA CON XPS	234.294	15001.196	15235.49

Tabla 2. Emisiones totales de Kg CO₂-eq para la vivienda para cada caso.

Finalmente, teniendo en cuenta una superficie de muros exteriores de 46.5 m² y una superficie total de la vivienda de 72 m², se obtienen los valores de emisiones de Kg CO₂-eq para la vivienda completa y el periodo desde 2020 a 2080 que se presentan en la Tabla 2.

Conclusiones

En este estudio se ha analizado el efecto del uso de aislantes fabricados con material textil reciclado para su uso en la rehabilitación de la un caso arquetípico de la vivienda social construida en el sur de España a mediados del siglo XX.

Dicho estudio evaluó el consumo energético a la luz del cambio de temperaturas previsto según el escenario A2 de cambio climático para el intervalo de tiempo desde 2020 hasta 2080.

Se analizaron tres casos de vivienda: la vivienda de referencia en su estado original, la misma rehabilitada con la instalación de un aislamiento de material textil reciclado en los muros exteriores y finalmente la misma vivienda rehabilitada con un aislamiento convencional XPS.

Como resultado del análisis se estableció la capacidad del aislamiento basado en textil reciclado para reducir el gasto energético para confort interior un 22.95 %, mientras que la vivienda rehabilitada con XPS produjo una cantidad similar de reducción del 22.96 %.

Por tanto a nivel de reducción del consumo energético para obtener confort interior no se observó diferencias significativas entre el uso del material textil reciclado y del XPS.

En una segunda fase, se evaluó la emisión de gases de efecto invernadero para cada caso.

Para ello se cuantificaron las emisiones producidas, tanto por la instalación de cada tipo de aislante, como el consumo operacional para confort interior.

Como resultado del análisis se concluyó que la vivienda rehabilitada con textil reciclado consigue una reducción del 22.63 % en las emisiones de CO₂, frente a un 21.74 % para la vivienda rehabilitada con XPS.

Por tanto, se concluye la idoneidad del uso del material textil reciclado para su uso en la rehabilitación de la vivienda social construida en España a mediados del siglo pasado, consiguiendo de esta forma avanzar en una doble vía: la reducción del gasto energético asociado a la obtención del confort interior, con la consiguientes repercusiones ambientales y sociales que ello conlleva, y la reducción del impacto ambiental que se consigue mediante en el reciclado de material textil.

En resumen, el uso del material textil reciclado para aislamiento en la construcción refuerza la economía circular, impulsa la transición hacia industrias más sostenibles y desempeña un papel significativo en la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero tanto en el presente como a la luz del cambio climático.

Referencias

European Environment Agency (2025). Circularity of the EU textiles value chain in numbers. EEA Briefing 03/2025. ISBN 978-92-9480-707-6; ISSN 2467-3196; DOI: 10.2800/5681501

Saafi, K.; Daouas, N. (2018). A life cycle cost analysis for an optimum combination of cool coating and thermal insulation of residential building roofs in Tunisia. *Energy*, 152, 925–938.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.010>

Análisis del potencial mitigador de recubrimientos fríos y baldosas de cemento con PET incorporado para afrontar las olas de calor en la vivienda social del sur de España.

Analysis of the mitigating potential of cool coatings and cement tiles with incorporated PET to address heat waves in social housing in southern Spain.

CARLOS A.DOMÍNGUEZ-TORRES/ Universidad de Sevilla

Palabras clave Keywords

Reciclaje de PET, enfriamiento radiativo, confort térmico.

PET recycling, radiative cooling, adaptive thermal comfort-

Resumen

En este estudio se explotan las buenas propiedades de comportamiento térmico de tejas de cemento extruido fabricadas con sustitución parcial de arena por escamas de tereftalato de polietileno (PET), en combinación con la refrigeración radiativa aportada por pinturas frías (cold paints). Esta estrategia se aplica a la rehabilitación energética de las cubiertas del parque de vivienda social construido en el sur de España en la mitad del siglo XX, con el objetivo de afrontar el aumento de temperaturas y la creciente frecuencia de olas de calor prevista por prácticamente todos los escenarios de cambio climático proyectados para las próximas décadas. Los resultados del estudio confirman el potencial de la combinación propuesta para mejorar la calidad de vida de los residentes en el parque de vivienda social analizado mejorando de forma notable la respuesta de las viviendas, en términos de confort, ante el impacto de las olas de calor. En consecuencia, el uso de tejas de cemento que incorporan PET, combinado con pinturas frías, constituye una estrategia técnicamente viable para fomentar la sostenibilidad urbana. Esta solución permite reducir el impacto ambiental desde un doble enfoque: disminuyendo las emisiones asociadas al consumo energético y transformando residuos en recursos útiles para construcción.

Abstract

This study exploits the good thermal behavior properties of extruded cement tiles manufactured with partial replacement of sand by polyethylene terephthalate (PET) flakes, in combination with the radiative cooling provided by cold paints. This strategy is applied to the energy rehabilitation of the roofs of social housing built in southern Spain in the mid-20th century, with the aim of addressing the rise in temperatures and the increasing frequency of heat waves predicted by virtually all climate change scenarios projected for the coming decades. The results of the study confirm the potential of the proposed combination to improve the quality of life of residents in the social housing complex analyzed, significantly improving the response of the homes in terms of comfort to the impact of heat waves. Consequently, the use of cement tiles incorporating PET, combined with cool paints, is a technically viable strategy for promoting urban sustainability. This solution reduces environmental impact in two ways: by reducing emissions associated with energy consumption and by transforming waste into useful resources for construction.

Introducción

El cambio climático, reconocido por la comunidad científica como un hecho innegable, proyecta un aumento significativo de las temperaturas globales. Así, según el informe AR4 del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), se prevé un fuerte aumento de las temperaturas en el Sur de Europa que a finales de siglo puede llegar a 4.4 °C. Asimismo, el IPCC, en su informe AR6, advierte que, junto al previsto aumento térmico, las **olas de calor** en el sur de Europa podrían multiplicarse entre tres y cinco veces respecto al período preindustrial, y su duración media podría duplicarse o incluso triplicarse en algunas regiones.

Las consecuencias de esta subida de temperaturas y del aumento de las olas de calor afectarán a la totalidad de la sociedad de forma global, pero de forma especialmente severa a los sectores más vulnerables de la misma, como es el caso de los usuarios del parque de vivienda social construido a mediados del siglo XX en el sur de España, caracterizado por la ausencia de condiciones adecuadas de aislamiento térmico en su envolvente y por tanto poco protegidas de los efectos de la prevista subida de temperaturas. Esta deficiencia suele traducirse en discomfort térmico interior, condiciones insalubres y situaciones de pobreza energética.

En base a lo dicho, es evidente que el consumo energético para proporcionar confort interior aumentará en zonas cálidas debido al aumento progresivo de las temperaturas y las cada vez más frecuentes olas de calor. Este incremento de consumo energético tendrá diversas repercusiones, tanto medioambientales al aumentar la emisión de gases de efecto invernadero, como sociales al incrementar la factura a pagar por los usuarios de las viviendas sociales lo que conducirá a un aumento de la pobreza energética y de las situaciones de incomfort térmico en dichas viviendas. Esta situación, que se prevé en particular para las zonas del sur de Europa, es extensible en general a zonas con clima cálido.

Ante ello, se hace necesario un doble enfoque de actuación para enfrentar el impacto de las futuras olas de calor: por un lado, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero mediante mecanismos como el reciclaje de materiales de uso común en la sociedad actual —por ejemplo, plásticos de distinta naturaleza—; por otro, la mitigación de los efectos adversos sobre la población mediante actuaciones de rehabilitación energética que permitan reducir el consumo energético destinado al confort, procurando además un impacto ambiental mínimo.

En base a lo expuesto, de forma específica está clara la necesidad de intervenir en el parque de vivienda social construido en las décadas centrales del siglo pasado en el sur de España a través de medidas de rehabilitación adecuadas que posibiliten la reducción del consumo energético necesario para obtener condiciones de confort interior ante el creciente aumento de temperaturas en general y en particular ante las previstas cada vez más frecuentes olas de calor.

El uso de PET en la construcción

En las últimas décadas ha habido un notable auge del uso en el área de la construcción de materiales procedentes de otros campos no habituales en dicha área. Este uso viene motivado, muchas veces, por la reducción del impacto ambiental que se consigue y por una apuesta clara por potenciar las estrategias de la economía circular. Un caso concreto de este tipo de usos lo constituye la utilización en la construcción de materiales procedentes del reciclaje como es el caso del PET (Polyethylene Terephthalate). Uno de los beneficios que se persigue con el uso del PET es retirar este material del medio ambiente, ya sea evitando su vertido directo u otras prácticas muy contaminantes como su incineración. A este respecto cabe reseñar, que hay un amplio margen de mejora para el reciclado de este material: a nivel europeo se estima que se recicla alrededor de un 60%, mientras que en Estados Unidos el porcentaje de reciclado de PET es de alrededor de un 30%. A nivel mundial, se estima que solo se recicla el 9% del plástico producido, incluyendo todo tipo de plásticos, entre ellos el PET.

Recientemente, el PET ha conocido una amplia expansión de su uso en la construcción como material adicional para la fabricación de múltiples elementos, como su uso en la elaboración de objetos y productos de hormigón. Por otro lado, recientes estudios han puesto de manifiesto su utilidad para la fabricación de distintos materiales y elementos útiles para su uso en la construcción. Así, en un reciente trabajo debido a Callejas et al. (2025) se analizó el uso de PET sustituyendo un cierto porcentaje de arena, para la fabricación de tejas de cemento para cubiertas. En dicho trabajo se caracterizaron sus propiedades térmicas y se establecieron las buenas propiedades mecánicas del producto resultante para su uso en cubiertas de edificios.

Cubiertas frías

En zonas mediterráneas, donde las temperaturas y la radiación solar son elevados en buena parte del año, aplicar técnicas de cubierta fría en edificios supone una estrategia de gran utilidad para mejorar la eficiencia energética de la envolvente y, en particular, de la cubierta. En concreto, la rehabilitación de cubiertas de viviendas sociales mediante este tipo de técnicas ha proporcionado excelentes resultados en el ámbito del sur de Europa (Domínguez-Torres et al, 2022).

Por ello, su uso puede ser de gran eficacia para reducir los efectos de las altas temperaturas que se producen en las olas de calor, que en el área del sur de España se ven potenciadas por los altos niveles de radiación solar que se dan en la estación cálida.

Las cubiertas frías pretenden, por un lado, minimizar la absorción de radiación solar y, por otro, emitir la máxima radiación térmica hacia el cielo disminuyendo la acumulación de temperatura en la cubierta.

La técnica más sencilla para conseguir cubiertas frías es la aplicación sobre la superficie exterior de la cubierta de una capa de pintura fría, ya muy extendidas en el mercado, y que se caracterizan por altos niveles de reflectividad de la radiación solar y altos valores de emisividad térmica.

En el presente trabajo se considera una pintura fría elaborada con un nanocompuesto de polímero mgo-pvdf que presenta una reflectividad solar del 96,3% y una emisividad térmica del 98,5%, como se pone de manifiesto en el trabajo de Das et al. (2023).

El producto tiene excelentes propiedades hidrófobas y puede aplicarse fácilmente a diversos materiales de construcción como baldosas, tejas, y otros, logrando una cobertura consistente y una excelente adhesión lo que la hace muy adecuada para su uso en construcción.

Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo principal analizar el comportamiento energético de una medida de rehabilitación consistente en la combinación de tejas de cemento que incorporan escamas de PET con una pintura fría para su uso en la rehabilitación de las cubiertas de viviendas sociales construidas en el sur de España a mediados del siglo pasado.

De forma específica se pretende evaluar la capacidad de la medida de rehabilitación propuesta para hacer frente al impacto de las olas de calor y mejorar las condiciones de confort interior de las viviendas ante dicho impacto.

Metodología

En este estudio se explotan las buenas propiedades de comportamiento térmico de tejas de cemento extruido fabricadas con sustitución parcial de arena por escamas de tereftalato de polietileno (PET), en combinación con la refrigeración radiativa aportada por pinturas frías. Esta estrategia se aplica a la rehabilitación energética de las cubiertas del parque de vivienda social construido en el sur de España en la mitad del siglo XX, con el objetivo de afrontar el aumento de temperaturas y la creciente frecuencia de olas de calor prevista por prácticamente todos los escenarios de cambio climático proyectados para las próximas décadas.

Caracterización de las baldosas de cemento con PET incorporado

Siguiendo el trabajo de Callejas et al. (2025), en este trabajo se consideran tejas de cemento elaboradas sustituyendo el 15% de la masa inicial de arena por escamas de PET. Las escamas de PET incorporadas durante el proceso de elaboración de las tejas tienen un diámetro entre 0.15 y 2.36 mm y una densidad de 1.33 g/cm³.

Las propiedades termofísicas de las tejas con PET incorporado se describen en la siguiente tabla, siguiendo los valores expuestos en Callejas et al. (2025):

Material	Grosor (m)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg K)	Conductividad (W/m K)	Reflectividad Solar	Emisividad térmica
Teja(PET)	0.02	2114	818	1.401	0.2213	0.9183

Tabla 1. propiedades termofísicas de las baldosas con PET incorporado

En los ensayos realizados en el trabajo citado de Callejas et al. se pone de manifiesto que el material elaborado con PET reúne las propiedades físicas y mecánicas adecuadas para su uso en cubiertas de edificios y por tanto es una opción viable para la rehabilitación considerada de cubiertas de viviendas sociales.

Modelo de confort adaptativo

Para explorar los posibles beneficios durante episodios de ola de calor de combinar las tejas con PET y la pintura fría para la rehabilitación de tejados de la vivienda social, se analizó el confort térmico interior usando para ello la metodología de confort térmico adaptativo.

El principio básico de los modelos de confort térmico adaptativo radica en el ajuste de los límites superior e inferior de confort térmico en respuesta a las variaciones de la temperatura exterior media durante un cierto periodo de tiempo anterior al momento en el que se evalúa dicho confort. Esta media se calcula de forma diferente según el modelo específico empleado.

En este trabajo se sigue uno de los modelos adaptativos más ampliamente adoptados: el definido en la norma internacional ASHRAE-55. Esta norma establece dos niveles de aceptabilidad, cada uno asociado a límites específicos de confort térmico como se expresa en las siguientes ecuaciones

$$\text{Límite superior (80\% aceptabilidad)} = 0.31 \cdot \overline{T_{pma(out)}} + 21.3 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1)$$

$$\text{Límite inferior (80\% aceptabilidad)} = 0.31 \cdot \overline{T_{pma(out)}} + 14.3 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2)$$

$$\text{Límite superior (90\% aceptabilidad)} = 0.31 \cdot \overline{T_{pma(out)}} + 20.3 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3)$$

$$\text{Límite inferior (90\% aceptabilidad)} = 0.31 \cdot \overline{T_{pma(out)}} + 15.3 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4)$$

Donde $\overline{T_{pma(out)}}$ es la temperatura media exterior prevalente. El valor de $\overline{T_{pma(out)}}$ es calculada para cada día d mediante:

$$\overline{T_{pma(out)}}(d) = (1 - \alpha) \cdot \sum_{i=1}^n (\alpha^{i-1} \cdot \overline{T_{ext}(d-i)}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5)$$

donde α es un factor entre 0.6 y 0.9 que depende de la latitud; n es el número de días previos que se considera, habitualmente entre 7 y 30 días.

En las formulas (1) a (4), $\overline{T_{ext}(d-1)}$ es la temperatura exterior media diaria del día anterior a d ,

$\overline{T_{ext}(d-2)}$ se refiere a dos días antes, y así sucesivamente.

Si la temperatura operativa interior se encuentra entre los límites de confort inferior y superior, se considera que cumple la condición de confort.

Este modelo se considera que tiene validez si $\overline{T_{pma(out)}}$ está dentro del rango entre 10 y 33.5 °C.

Originalmente el modelo se le suponía validez en edificios con ventilación natural. Recientemente, algunos trabajos han extendido su validez en edificios que funcionan en modo mixto; para ello la ventilación natural se usa en condiciones exteriores favorables y en caso contrario se recurre a climatización mecánica.

Caso de estudio

Como caso de estudio se considera un caso de vivienda social en la ciudad de Sevilla construida en la década de 1960 y que constituye un representante arquetípica de este tipo de viviendas construidas en el Sur de España a mediados del siglo pasado. El barrio donde se sitúa es el barrio del Plantinar. Como se ha dicho anteriormente, estas viviendas se caracterizan por una obsoleta envolvente desde el punto de vista energético que las hace muy vulnerables a las condiciones climáticas en general y a las olas de calor en particular.



Figura 1. Vivienda caso de estudio (Fuente: autor).

Condiciones climáticas

El análisis que se efectúa en el presente trabajo toma en consideración las condiciones climáticas en la ciudad de Sevilla desde los días 17 a 26 de Agosto de 2023. Entre los días 19 a 25 inclusive de dicho periodo, se produjo una ola de calor en la que se sobrepasaron los 42 °C prácticamente todos los días, sobrepasando los 43 °C el día 25.

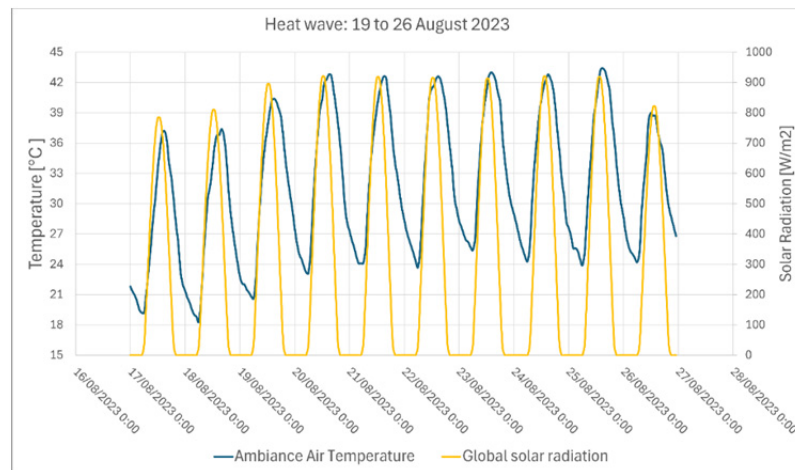


Figura 2. Temperaturas y radiación solar durante la ola de calor (Fuente: autor).

Por otro lado, las temperaturas mínimas durante este periodo fueron casi todos los días superiores a los 24 °C, o muy cercanas a esta cifra, rozando el umbral de lo que se conoce como noches tórridas (>25 °C) o incluso superándolo, como ocurrió el día 23 de agosto.

Evaluación del confort interior

La evaluación del confort interior se efectuó en dos fases:

FASE 1. Determinación de la temperatura operativa de la vivienda.

Para ello se tuvieron en consideración los siguientes puntos:

- La vivienda considerada se representó como una zona única, en consonancia con Saafi et al. (2018).
- Las condiciones de frontera tuvieron en cuenta el balance energético de las superficies exteriores, incluidos la cubierta, las paredes exteriores y el suelo (es decir, se tuvo en cuenta el flujo de calor con la vivienda vecina planta inferior)
- Los flujos de calor hacia las viviendas vecinas de la misma planta del edificio se consideraron adiabáticos.
- Las simulaciones se realizaron utilizando el software EnergyPlus.

- Se consideraron dos tasas de ventilación equivalentes a 0,5 y 1,5 renovaciones de aire por hora (ACH) durante la noche para analizar el impacto de la ventilación en los niveles de confort interior. En cuanto a las persianas, se consideró que estaban abiertas por la noche y cerradas al 80 % durante el periodo diurno.

FASE 2. Computo del número de horas dentro de los límites de confort.

Este computo se realizó siguiendo los siguientes pasos:

- Para cada día *d* del periodo de ola de calor en Sevilla, se determinó la temperatura media exterior prevalente utilizando la ecuación (5) antes presentada.
- La aplicabilidad del método adaptativo se evalúa mediante la aplicación de los límites mencionados anteriormente, es decir temperatura media exterior prevalente entre 10 y 33.5 °C.
- Cuando el método adaptativo es aplicable, las ecuaciones (1) y (2) (nivel de aceptabilidad del 80%) se aplican cada hora para comprobar si la temperatura operativa interior en esa hora se encuentra dentro del rango de confort.
- Por último, se contabilizan las horas de confort para cada día durante el intervalo de tiempo analizado.

Resultados

En la Fig. 3 se presentan los resultados para la tasa de ventilación de 0.5 ACH. Como se aprecia en la figura, el caso de referencia tiene todas las horas fuera de la banda de confort, incluidas las noches en las que se activa la ventilación nocturna. En el caso de la vivienda con la cubierta rehabilitada con tejas de hormigón con PET incorporado y pintura fría, todas las horas diurnas se encuentran dentro de la banda de confort. Sin embargo, para la noche con el umbral de confort en 27 °C como límite tolerable, se observa que para el caso rehabilitado también casi todas las horas, a partir del día 20, están fuera del rango de confort. Aunque, como se aprecia en la gráfica la severidad de inconfort es mucho menor que para el caso de referencia.

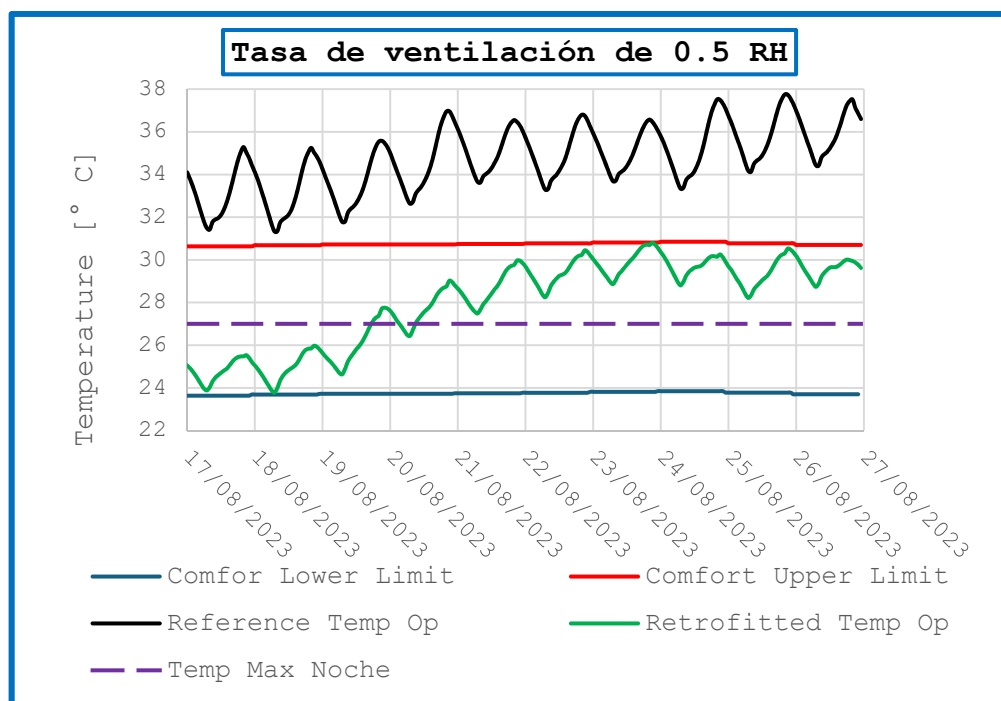


Figura 3. Temperaturas operativas y rango de confort para la tasa de ventilación 0.5 RH (Fuente: autor).

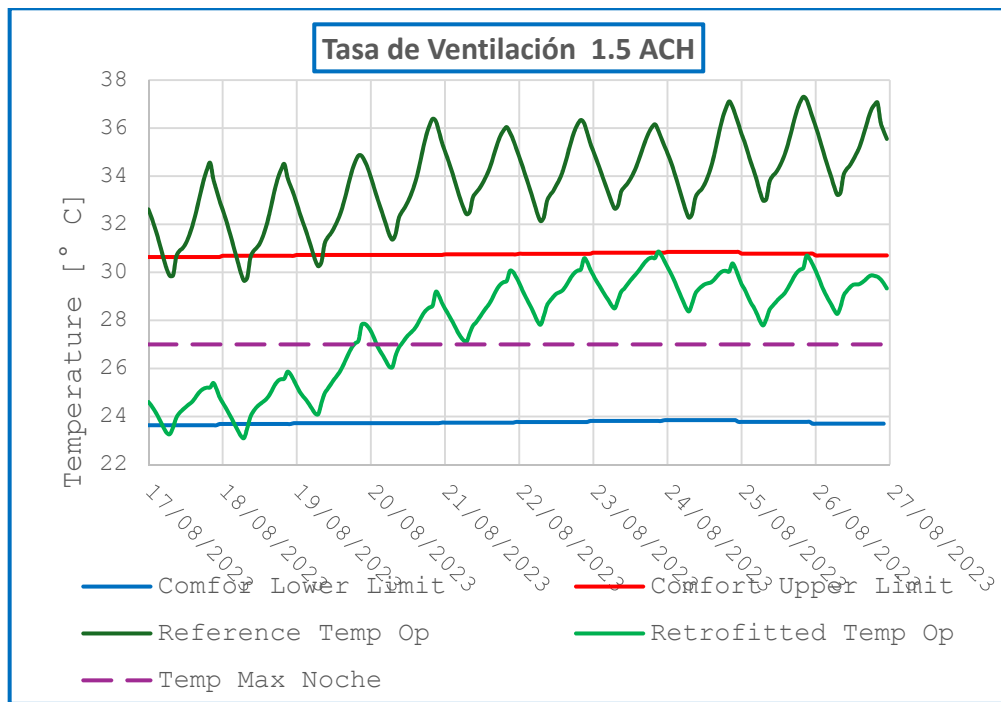


Figura 4. Temperaturas operativas y rango de confort para la tasa de ventilación 1.5 RH (Fuente: autor).

Como se aprecia en la Figura 4, el caso de referencia vuelve a tener todas las horas fuera de la banda de confort durante la ola de calor, incluidas las noches en las que se activa la ventilación nocturna. En el caso de la vivienda con la cubierta rehabilitada con tejas de hormigón con PET incorporado y pintura fría, todas las horas diurnas se encuentran dentro de la banda de confort. Nuevamente, para la noche con el umbral de confort en 27 °C como límite tolerable, se observa que para el caso rehabilitado también casi todas las horas, a partir del día 21, están fuera del rango de confort. Aunque, nuevamente, la severidad es menor que para el caso de referencia.

En la Tabla 2, se presentan el número de horas de confort y el porcentaje de las mismas sobre el total de horas, tanto para el caso de referencia como el rehabilitado y para las dos tasas de ventilación analizadas.

	0.5 ACH		1.5 ACH	
	Horas de confort	Porcentaje de horas de confort	Horas de confort	Porcentaje de horas de confort
Caso de referencia	0	0	9	6.38
Caso rehabilitado	140	72.91	141	73.43

Tabla 2. Horas de confort para cada caso analizado.

Para las dos tasas de ventilación consideradas, el caso rehabilitado consigue un notable aumento de las horas de confort: sin paliar del todo el problema, aporta una sustancial mejora.

El problema de las horas de inconfort se produce sobre todo de noche, donde la ventilación nocturna es incapaz de proporcionar una temperatura interior adecuada.

Conclusiones

Como resultado de la investigación desarrollada se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La solución constructiva de rehabilitación considerada proporciona una notable reducción en las temperaturas operativas del interior de la vivienda analizada durante todo el periodo de la ola de calor considerada y para las dos tasas de ventilación nocturna aplicadas.
- La solución constructiva de rehabilitación considerada es capaz de proporcionar un considerable aumento de las horas de confort frente al caso de referencia: un 72.91 % de horas de confort para una tasa de ventilación de 0.5 ACH, y un 73.43 % para una tasa de ventilación de 1.5 ACH, frente al 0 % y el 6.38 % del caso de referencia para las mismas tasas de ventilación.
- En las horas en las que la solución constructiva de rehabilitación considerada no proporciona confort, el grado de severidad de esta falta de confort es mucho mayor que para el caso de referencia.
- En las horas en las que la solución constructiva de rehabilitación considerada no proporciona confort, el grado de severidad de esta falta de confort es mucho mayor que para el caso de referencia.

En resumen, se pueden señalar dos ventajas importantes del uso de PET reciclado en la fabricación de tejas de cemento en combinación con la pintura fría:

- la reducción de residuos y de emisiones de gases de efecto invernadero gracias a la reutilización de un PET que es difícil de utilizar en otras aplicaciones, y
- la mejora sustancial que supone para los usuarios de viviendas sociales al aumentar significativamente la calidad de la habitabilidad interior cuando se combina con un material fácil de instalar y económico, como las pinturas frías.

Por todo ello se concluye la idoneidad del uso de la solución constructiva de rehabilitación considerada para la **rehabilitación** de las cubiertas de la vivienda social analizada gracias a las ventajas señaladas.

Referencias

Das P, Rudra S, Maurya K, et al (2023) Ultra-emissive mgo-pvdf polymer nanocomposite paint for passive daytime radiative cooling. *Advanced Material Technologies* 8:1 –8. <https://doi.org/10.1002/admt.202301174>

Domínguez-Torres, C.-A., Domínguez-Torres, H., & Domínguez-Delgado, A. (2021). Optimization of a Combination of Thermal Insulation and Cool Roof for the Refurbishment of Social Housing in Southern Spain. *Sustainability*, 13(19), 10738. <https://doi.org/10.3390/su131910738>

Saafi, K.; Daouas, N. (2018). A life cycle cost analysis for an optimum combination of cool coating and thermal insulation of residential building roofs in Tunisia. *Energy*, 152, 925–938. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.010>

El diseño para el desmontaje de sistemas constructivos de CLT

Design for Disassembly of CLT Construction Systems

MARINA IGUAZ RAMOS/ Universidad Politécnica de Madrid

BEATRIZ ARRANZ ARRANZ/ Universidad Politécnica de Madrid

Palabras clave Keywords

CLT, reutilización, diseño para el desmontaje, uniones reversibles, banco de materiales.

CLT, reuse, design for disassembly, reversible connections, material bank.

Resumen

El sector de la construcción es la actividad económica con mayor impacto ambiental a nivel global. Esto es consecuencia del modelo económico lineal predominante en la actualidad.

La recuperación y reutilización de materiales de construcción de edificaciones existentes, contribuye a la transición del sector hacia una economía circular. Su implementación a gran escala enfrenta diversas dificultades que el Diseño para el Desmontaje podría ayudar a resolver, transformando el edificio en un banco de materiales.

En este contexto, la madera destaca como material renovable, reciclable, almacén de carbono y eficiente en términos constructivos. En formato CLT permite la prefabricación, modularidad y construcción en altura gracias a su homogeneidad y estabilidad dimensional.

La investigación desarrolla una metodología para evaluar la desmontabilidad de los sistemas constructivos de CLT. Esta metodología se aplica a tres proyectos representativos.

Finalmente, se revisan los resultados tanto de las evaluaciones de los casos de estudio como de la herramienta desarrollada y se realizan propuestas para su desarrollo futuro.

La investigación busca impulsar una arquitectura diseñada para el desmontaje, con la que reducir el impacto ambiental del sector de la construcción.

Abstract

The construction sector is the economic activity with the greatest environmental impact worldwide, a consequence of the currently predominant linear economic model.

The recovery and reuse of construction materials from existing buildings would support the sector's transition toward a circular economy. However, its large-scale implementation faces several challenges that Design for Disassembly could help address, transforming buildings into material banks.

In this context, wood stands out as a renewable, recyclable, carbon-storing, and construction-efficient material. In its CLT format, it enables prefabrication, modularity, and multi-storey construction thanks to its homogeneity and dimensional stability.

The research develops a methodology for evaluating the potential for disassembly of CLT construction systems. This methodology is applied to three representative projects.

Finally, the results of both the case study evaluations and the developed tool are reviewed, and proposals are made for their future development.

The aim of the research is to promote an architecture designed for disassembly, thereby reducing the environmental impact of the construction sector

Metodología

La investigación se inició con una revisión del estado del arte, a partir de la cual se formularon la hipótesis y el objetivo principal de la investigación.

Con el fin de alcanzar dicho objetivo, se identificó la necesidad de desarrollar una metodología específica que permitiese evaluar el potencial de desmontaje de un sistema constructivo. Para ello, se llevó a cabo un análisis crítico de normas, herramientas y metodologías existentes vinculadas al Diseño para el Desmontaje (DfD), identificando sus limitaciones, vacíos y oportunidades de mejora. Este proceso culminó en la elaboración de una propuesta metodológica propia.

La metodología desarrollada se aplicó posteriormente a tres casos de estudio representativos. A partir de los cuales se obtuvieron una serie de resultados que fueron analizados en detalle, lo que permitió extraer una serie de conclusiones tanto sobre la compatibilidad entre los sistemas constructivos de CLT y los principios del DfD, como sobre el desempeño de la herramienta metodológica propuesta.

Estructura del capítulo

Para facilitar la comprensión del texto y evitar redundancias, este capítulo seguirá la lógica de la metodología empleada durante la investigación, con la excepción de que, en vez de desarrollar en primer lugar la propuesta metodológica y posteriormente su aplicación a los casos de estudio, se presentarán conjuntamente.

Estado de la cuestión

Impacto ambiental del sector de la construcción

El sector de la construcción es, actualmente, la actividad económica con mayor impacto ambiental a nivel global. En la Unión Europea concentra el 40% de la demanda energética, el 35% de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y el 50% del consumo de recursos naturales (GBCe, 2021).



Figura 1. Porcentajes de demanda energética, emisiones de GEI, consumo de recursos y agua del sector de la construcción en Europa. (GBCe, 2021).

Además, genera un 38,4% de los residuos totales, gran parte de los cuales termina en vertederos o es incinerada sin valorización energética (Parlamento Europeo, 2024). Esta problemática deriva del modelo económico dominante en la actualidad, la economía lineal, basada en extraer, fabricar, usar y desechar, que resulta insostenible debido al consecuente agotamiento de materias primas, el aumento de emisiones de GEI y la generación masiva de desechos.

Diseño para el Desmontaje (DfD)

La economía circular es un modelo económico regenerativo que se opone a este modelo lineal. Promueve el uso eficiente de materiales, la reutilización, el reciclaje y la prolongación del ciclo de vida de productos y componentes.

La minería urbana propone la recuperación y reutilización de materiales de edificios existentes, tratándolos como canteras urbanas. Además de barreras culturales y normativas, la minería urbana presenta dificultades intrínsecas asociadas al proceso de recuperación de materiales en edificios que no fueron diseñados para su desmontaje, sino para ser demolidos. La deconstrucción de estas estructuras es compleja y, en muchos casos, conlleva la pérdida o el daño significativo de los materiales. Restaurar los elementos recuperados suele requerir procedimientos técnicos exigentes para devolverles la funcionalidad o valor comercial. Una limitación adicional es la falta de trazabilidad, ya que en edificios

antiguos no se suele contar con información precisa sobre los materiales empleados, su composición química ni su potencial toxicidad, lo que dificulta su recuperación posterior reutilización. La deconstrucción selectiva demanda una inversión considerable de tiempo y mano de obra especializada, que a menudo supera el valor económico de los materiales recuperables.

Una estrategia clave para facilitar el desmontaje de los edificios y, por lo tanto, la recuperación y reutilización de sus materiales es la aplicación de las estrategias del DfD. Este tipo de diseño requiere pensar el edificio como un banco de materiales, un depósito temporal de materiales “que, tras cumplir su función en un edificio, pueden reincorporarse al sistema productivo sin perder calidad ni propiedades” (Forcada Matheu, 2024).

La madera contralaminada (CLT)

“El uso extensivo de materiales no renovables en la industria de la construcción está provocando un agotamiento más rápido de los recursos disponibles y un aumento de las emisiones de CO₂ y del consumo energético debido a los procesos de fabricación” (Pozzi, 2019). Ante esta situación, se vuelve esencial fomentar el uso de materiales renovables como la madera. Un material natural y compuesto en gran parte por carbono capturado durante el crecimiento del árbol. Además de su bajo impacto ambiental, la madera masiva presenta ventajas estructurales significativas. Su ligereza reduce el tamaño de las cimentaciones y mejora la eficiencia constructiva. En forma de CLT, además, permite la prefabricación, la modularidad y el desarrollo de proyectos en altura gracias a su homogeneidad y estabilidad dimensional.

Hipótesis y objetivo

Tras esta revisión del estado de la cuestión se llega a la siguiente hipótesis. El uso de sistemas constructivos de CLT y la aplicación de estrategias de Diseño para el Desmontaje en el inicio del ciclo de vida de los edificios facilitará la reutilización de sus componentes y contribuirá a la reducción de las emisiones de GEI y la extracción de recursos en el sector de la construcción.

El objetivo de la investigación será analizar y evaluar los procesos de montaje de sistemas constructivos con CLT para proponer recomendaciones que faciliten su reutilización al final de su ciclo de vida.

Desarrollo y aplicación de la propuesta metodológica

Para lograr el objetivo se desarrollará una nueva propuesta metodológica que permita evaluar los procesos de montaje de sistemas constructivos y se aplicará a tres casos de estudio

Selección de casos de estudio

Los casos de estudio seleccionados fueron la biblioteca Gabriel García Márquez en Barcelona de SUMA Arquitectura, las 85 viviendas sociales en Cornellá, Barcelona de Peris+Torral Arquitectes y las viviendas de CLT con fachada de madera carbonizada en Madrid de b720 Fermín Vázquez Arquitectos. Se seleccionaron por tratarse de edificios construidos en España con un sistema constructivo de CLT y sobre los que se tenía suficiente información para realizar las evaluaciones.

Revisión de metodologías existentes e identificación de limitaciones

La tabla de la (Fig. 2), basada en una realizada por (Laasonen & Pajunen, 2023), sintetiza los criterios abordados por cada metodología estudiada: una “x” señala su presencia explícita, un “-” su ausencia, y un “*” una mención ambigua o implícita.

Destaca la presencia en todas las metodologías revisadas del criterio de reversibilidad de las conexiones. Se presentan algunas contradicciones en los enfoques que se dan a algunos criterios. Mientras que (Pozzi, 2019) valora positivamente las conexiones ocultas debido a su mejor comportamiento ante el fuego al estar menos expuestas, (UNE-ISO 20887; Sostenibilidad en edificios y obras de ingeniería civil Diseño para el desmontaje y la adaptabilidad Principios, requisitos y directrices, 2023) y (Guy & Ciarimboli, 2008) priorizan las conexiones visibles, ya que estas facilitan el desmontaje. Esto evidencia que la relevancia de los criterios depende de los objetivos específicos del proyecto,

tampoco sería realista esperar que todos los elementos cumplan simultáneamente todos los criterios, por lo que es necesaria la implementación de una jerarquización.

CRITERIOS	METODOLOGÍAS						
	Norma UNE	Guía	Estudios científicos				Herramienta
	ISO 20887	Guy and Clarimbot	Pozzi	Casa Grande et al.	Yan et al.	Piccardio and Huges	RE-10
Facilidad de acceso a los componentes y servicios	X	X	X	-	-	-	X
Velocidad	-	-	-	X	-	-	X
Visibilidad de las conexiones	X	X	X	-	X	-	X
Espacio necesario para realizar el desmontaje	X	-	-	-	-	-	X
Independencia	X	*	*	-	-	X	X
Separación de sistemas mecánicos, eléctricos y de fontanería	-	X	-	-	-	-	-
Capas independientes	X	X	-	-	-	-	X
Conexiones reversibles	X	X	X	X	X	X	X
- Mismas herramientas para montaje y desmontaje	X	-	-	-	-	-	X
- Número de elementos de la conexión (conectores)	-	-	X	-	X	X	-
- Complejidad de los elementos de conexión	-	*	X	-	-	-	-
- Grado de estandarización de las conexiones	*	-	X	X	-	-	-
- Documentación de la conexión	X	-	-	-	-	-	-
- Facilidad de desmontaje	X	*	X	-	-	-	-
- Resíduos al final del ciclo de vida de la conexión	-	-	X	-	-	-	-
- Reusabilidad de los elementos de la conexión	X	-	X	-	-	-	-
- Precio de la conexión	-	-	X	-	-	X	-
- Rigidez de la conexión	X	-	*	X	X	-	-
- Resistencia estructural de la conexión	X	-	X	X	X	-	-
Apoyo a los modelos empresariales de economía circular	X	-	*	-	*	-	X
Selección de materiales ecológicos, reutilizados, reciclados...	X	X	-	-	-	-	X
Reusabilidad de los materiales	X	-	X	*	X	-	-
- Durabilidad	X	-	-	-	-	-	X
- Selección de materiales y sistemas bajo criterios de adecuación al uso y durabilidad	X	X	-	-	-	-	X
- Plan de mantenimiento preventivo	X	-	-	-	-	*	X
- Gestión de la información: Modelo BIM	X	-	-	X	X	-	X
- Uso de materiales, productos o procesos con distintivo de calidad o de evaluaciones técnicas de idoneidad	*	*	X	X	X	-	X
- Evitar tratamientos y acabados innecesarios	X	-	*	-	-	-	X
- Acabados	X	-	X	-	-	-	X
- Minimizar o eliminar conexiones químicas en los acabados	X	X	-	-	-	*	X
Eficiencia en el proceso constructivo							
Simplicidad	X	X	*	X	-	-	*
- Número de conexiones y de tipos de conexiones	X	*	-	-	-	X	-
- Número de elementos, componentes o materiales	X	*	X	-	-	-	-
- Complejidad de los elementos	X	-	X	-	-	-	-
Normalización	X	*	-	-	X	X	X
- Componentes, productos, piezas normalizados	X	X	-	-	-	-	X
- Construcción modular	X	X	X	-	X	-	-
- Grado de prefabricación	X	-	X	X	X	X	*
- Uso de uniones reversibles	-	X	*	*	*	*	-
Procedimiento claro de desmontaje	X	X	-	-	-	-	X
Resistencia estructural	-	-	-	X	-	-	-
Facilidad de montaje	-	-	X	X	X	-	-
Facilidad de desmontaje	-	*	X	-	-	-	-
Peso	-	-	-	X	-	-	-
Coste	-	-	X	-	-	X	-
Ciclo de fin de vida	-	-	X	-	-	-	-

Figura 2. Comparación de criterios mencionados en las metodologías estudiadas. Elaboración propia a partir de la tabla realizada por (Laasonen & Pajunen, 2023).

Jerarquización y ponderación de criterios

El proceso detallado a continuación se aplica dos veces, primero para jerarquizar los criterios generales para los elementos y posteriormente las uniones, con el objetivo de comprender el diseño para el desmontaje de la forma más integral posible. Ambos enfoques resultan complementarios y necesarios. De poco sirve que una unión sea técnicamente desmontable si el diseño del sistema impide acceder a ella, y al contrario.

La herramienta adoptará el enfoque propuesto por (Pozzi, 2019), basado en una versión simplificada del método multicriterio para toma de decisiones AHP (Analytic Hierarchy Process), el cual permite ordenar jerárquicamente los criterios de evaluación mediante comparaciones por pares y juicios cualitativos, construyendo así una representación más fiel de su importancia relativa en el diseño para el desmontaje. Se comienza el proceso con las siguientes plantillas, una para elementos (Fig. 3) y otra para uniones (Fig. 4).

A cada criterio se le asigna un valor de “1” si se considera más relevante que su contraparte, y “0” en caso contrario.

Para asignar estos valores (1, 0) se sigue una jerarquía de prioridades: En primer lugar, la seguridad estructural y la viabilidad constructiva, ya que se consideran prerequisites básicos para la construcción de cualquier arquitectura. En segundo lugar, la facilidad de desmontaje, específicamente del CLT. En tercer lugar, la reutilización de los componentes y, por último, los factores facilitadores.

A continuación, se rellenan las tablas de las figuras 3 y 4 para los tres casos de estudio. En este caso solo se mostrarán las tablas de elementos, el proceso sería exactamente igual para las uniones para las que se rellena la tabla correspondiente (Fig.4).

La importancia relativa de cada criterio puede variar significativamente según el tipo de proyecto. El criterio del coste adquiere un peso muy diferente en el proyecto del estudio b720 Fermín Vázquez Arquitectos, donde según sus palabras, “a pesar de todo, tanto el promotor como nosotros hemos intentado ir un poco más allá de lo que quizá los números estrictamente harían recomendable” (Tectónica, 2025) que en unas viviendas de protección oficial como las diseñadas por Peris+Toral Arquitectes.

COMPARACIÓN POR PARES DE LOS CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA DESMONTABILIDAD DE ELEMENTOS DE CLT																		
	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	12	Visibilidad de las conexiones	
0		1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	11	Espacio necesario para realizar el desmontaje	
0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	Separación de sistemas mecánicos, eléctricos y de fontanería	
1	1	1		0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	13	Capas independientes	
1	1	1	1		1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	14	Conexiones reversibles	
0	0	1	0	0		0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	5	Selección de materiales ecológicos, reutilizados, reciclados...	
0	0	1	0	0	1		0	0	0	0	1	0	1	1	1	6	Reusabilidad	
0	0	1	0	0	1	1		1	1	0	1	1	1	1	1	10	Simplicidad	
0	0	1	0	0	1	1	0		1	0	1	1	1	1	1	9	Normalización	
0	0	1	0	0	1	1	0	0		0	1	0	1	1	1	7	Procedimiento claro de desmontaje (documentación)	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	15	Rigidez de la estructura	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	Facilidad de montaje	
0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1		1	1	1	8	Facilidad de desmontaje	
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0		0	0	0	2	Peso	
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		1	0	3	Coste	
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1		1	4	Ciclo de fin de vida	
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1				
Visibilidad de las conexiones																		
Espacio necesario para realizar el desmontaje																		
Separación de sistemas mecánicos, eléctricos y de fontanería																		
Diseño por capas independientes																		
Conexiones reversibles																		
Selección de materiales ecológicos, reutilizados, reciclados...																		
Reusabilidad																		
Simplicidad																		
Normalización																		
Procedimiento claro de desmontaje																		
Rigidez de la estructura																		
Facilidad de montaje																		
Facilidad de desmontaje																		
Peso																		
Coste																		
Ciclo de fin de vida																		
Total																		

Figura 5. Comparación por pares de los criterios para la evaluación de los elementos. Biblioteca Gabriel García Márquez en Barcelona de SUMA Arquitectura. Elaboración propia.

COMPARACIÓN POR PARES DE LOS CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA DESMONTABILIDAD DE ELEMENTOS DE CLT																
	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	12
0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	11
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	13
1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	14
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	5
0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	6
0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	10
0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	9
0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	7
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	8
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	3
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	4
Visibilidad de las conexiones																
Espacio necesario para realizar el desmontaje																
Separación de sistemas mecánicos, eléctricos y de fontanería																
Diseño por capas independientes																
Conexiones reversibles																
Selección de materiales ecológicos, reutilizados, reciclados...																
Reusabilidad																
Simplicidad																
Normalización																
Procedimiento claro de desmontaje																
Rigidez de la estructura																
Facilidad de montaje																
Facilidad de desmontaje																
Peso																
Coste																
Ciclo de fin de vida																
Total																

Figura 6. Comparación por pares de los criterios para la evaluación de los elementos. Viviendas de CLT con fachada de madera carbonizada en Madrid de b720 Fermín Vázquez Arquitectos . Elaboración propia.

COMPARACIÓN POR PARES DE LOS CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA DESMONTABILIDAD DE ELEMENTOS DE CLT																
	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	11
0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	12
1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	13
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	4
0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	5
0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	9
0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	8
0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	6
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	7
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	14
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
Visibilidad de las conexiones																
Espacio necesario para realizar el desmontaje																
Separación de sistemas mecánicos, eléctricos y de fontanería																
Diseño por capas independientes																
Conexiones reversibles																
Selección de materiales ecológicos, reutilizados, reciclados...																
Reusabilidad																
Simplicidad																
Normalización																
Procedimiento claro de desmontaje																
Rigidez de la estructura																
Facilidad de montaje																
Facilidad de desmontaje																
Peso																
Coste																
Ciclo de fin de vida																
Total																

Figura 7. Comparación por pares de los criterios para la evaluación de los elementos. 85 viviendas sociales en Cornellà, Barcelona de Peris+ Toral Arquitectes. Elaboración propia.

Sumando las puntuaciones obtenidas en las comparaciones por pares, en rojo, se obtiene una jerarquía de criterios.

CRITERIOS ORDENADOS JERÁRQUICAMENTE	CRITERIOS ORDENADOS JERÁRQUICAMENTE	CRITERIOS ORDENADOS JERÁRQUICAMENTE
15 Rigidez de la estructura	15 Rigidez de la estructura	15 Rigidez de la estructura
14 Conexiones reversibles	14 Conexiones reversibles	14 Coste
13 Capas independientes	13 Capas independientes	13 Conexiones reversibles
12 Visibilidad de las conexiones	12 Visibilidad de las conexiones	12 Capas independientes
11 Espacio necesario para realizar el desmontaje	11 Espacio necesario para realizar el desmontaje	11 Visibilidad de las conexiones
10 Simplicidad	10 Simplicidad	10 Espacio necesario para realizar el desmontaje
9 Normalización	9 Normalización	9 Simplicidad
8 Facilidad de desmontaje	8 Facilidad de desmontaje	8 Normalización
7 Procedimiento claro de desmontaje (documentación)	7 Procedimiento claro de desmontaje (documentación)	7 Facilidad de desmontaje
6 Reusabilidad Selección de materiales ecológicos, reutilizados, reciclados...	6 Reusabilidad	6 Procedimiento claro de desmontaje (documentación)
5 Ciclo de fin de vida	5 Selección de materiales ecológicos, reutilizados, reciclados.	5 Reusabilidad
4 Coste	4 Ciclo de fin de vida	4 Selección de materiales ecológicos, reutilizados, reciclados.
3 Peso	3 Coste	3 Ciclo de fin de vida
2 Separación de sistemas mecánicos, eléctricos y de fontanería	2 Peso	2 Separación de sistemas mecánicos, eléctricos y de fontanería
1 Facilidad de montaje	1 Separación de sistemas mecánicos, eléctricos y de fontanería	1 Facilidad de montaje
0 Facilidad de montaje	0 Facilidad de montaje	0 Facilidad de montaje

Figura 8. Criterios de los elementos ordenados jerárquicamente. Biblioteca Gabriel García Márquez en Barcelona de SUMA Arquitectura. Elaboración propia.

Figura 9. Criterios de los elementos ordenados jerárquicamente. Viviendas de CLT con fachada de madera carbonizada en Madrid de b720 Fermín Vázquez Arquitectos. Elaboración propia

Figura 10. Criterios de los elementos ordenados jerárquicamente. 85 viviendas sociales en Cornellà, Barcelona de Peris+Toral Arquitectes. Elaboración propia.

A continuación, se asigna un coeficiente de ponderación a cada criterio, en función de su importancia relativa. Cuanto más relevante sea el criterio, en el contexto concreto de cada proyecto a evaluar, mayor será su peso numérico.

CRITERIOS ORDENADOS JERÁRQUICAMENTE	COEF.	CRITERIOS ORDENADOS JERÁRQUICAMENTE	COEF.	CRITERIOS ORDENADOS JERÁRQUICAMENTE	COEF.
13 Resistencia estructural de la conexión	0	13 Resistencia estructural de la conexión	5	13 Resistencia estructural de la conexión	5
12 Rigidez de la conexión		12 Rigidez de la conexión		12 Rigidez de la conexión	
11 Independencia entre los distintos componentes		11 Independencia entre los distintos componentes		11 Precio de la conexión	
10 Acabado. Facilidad de acceso a los componentes		10 Acabado. Facilidad de acceso a los componentes		10 Independencia entre los distintos componentes	
9 Facilidad de desmontaje	4	9 Facilidad de desmontaje	4	9 Acabado. Facilidad de acceso a los componentes	4
8 Número de elementos de la conexión		8 Número de elementos de la conexión (conectores)		8 Facilidad de desmontaje	
7 Grado de normalización		7 Grado de normalización		7 Número de elementos de la conexión (conectores)	
6 Complejidad de los elementos de conexión		6 Complejidad de los elementos de conexión		6 Grado de normalización	
5 Mismas herramientas para montaje como para desmontaje	3	5 Mismas herramientas para montaje como para desmontaje	3	5 Complejidad de los elementos de conexión	3
4 Procedimiento claro de desmontaje de la unión		4 Documentación de la conexión		4 Mismas herramientas para montaje como para desmontaje	
3 Reusabilidad de los elementos de la conexión		3 Reusabilidad de los elementos de la conexión		3 Documentación de la conexión	
2 Residuos al final del ciclo de vida de la conexión		2 Residuos al final del ciclo de vida de la conexión		2 Reusabilidad de los elementos de la conexión	
1 Precio de la conexión	1	1 Precio de la conexión	2	1 Residuos al final del ciclo de vida de la conexión	2
0 Facilidad de montaje		0 Facilidad de montaje		0 Facilidad de montaje	

Figura 11. Criterios de los elementos ordenados jerárquicamente con coeficiente. Biblioteca Gabriel García Márquez en Barcelona de SUMA Arquitectura. Elaboración propia.

Figura 12. Criterios de los elementos ordenados jerárquicamente con coeficiente. Viviendas de CLT con fachada de madera carbonizada en Madrid de b720 Fermín Vázquez Arquitectos. Elaboración propia

Figura 13. Criterios de los elementos ordenados jerárquicamente con coeficiente. 85 viviendas sociales en Cornellà, Barcelona de Peris+Toral Arquitectes. Elaboración propia.

Selección de elementos y uniones a evaluar de cada proyecto

Una vez definidos los criterios y sus coeficientes se procede a la selección de los elementos constructivos a evaluar, rellendo la tabla de la Fig.14. Dado que la presente investigación se centra en sistemas de CLT, se evaluará componentes clave que empleen este material: cubiertas, fachadas, forjados y uniones.

SELECCIÓN DE INTERVENCIONES A EVALUAR						
CÓDIGO		INTERVENCIÓN	¿INTERVIENE EN EL PROYECTO?	¿HAY INFO?	¿CON CLT?	¿SE EVALUARÁ?
CASO DE ESTUDIO	DETALLE					
		Cubiertas	SI/NO			
	1 C	Cubiertas				
		Fachada y particiones				
	1 FA	Fachadas				
		Estructuras				
	1 FI	Forjado interior				
	1 FE	Forjado exterior				
		UNIONES				
	1 MM	Unión entre paneles - muro				
	1 FF	Unión entre paneles - forjado				
	1 MF	Unión entre muro y forjado				
	1 VMF	Unión entre viga, muro y forjado				
	1 VPF	Unión entre viga, pilar y forjado				
	1 ML	Unión entre muro y losa de cimentación				
	1 PL	Unión entre pilar y losa de cimentación				

Figura 14. Plantilla de selección de intervenciones a evaluar. Elaboración propia.

Aunque para realizar el estudio se evaluaron todos los detalles y elementos, este artículo se enfocará únicamente en los forjados interiores y en las uniones entre paneles forjado marcados en las tablas siguientes con un rectángulo rojo.

SELECCIÓN DE INTERVENCIONES A EVALUAR						
CÓDIGO		INTERVENCIÓN	¿INTERVIENE EN EL PROYECTO?	¿HAY INFO?	¿CON CLT?	¿SE EVALUARÁ?
CASO DE ESTUDIO	DETALLE					
			SI/NO			
		Cubiertas				
1 C	Cubiertas		SI	SI	NO	NO
		Fachada y particiones				
1 FA	Fachadas		SI	SI	SI	SI
		Estructuras				
1 FI	Forjado interior		SI	SI	SI	SI
1 FE	Forjado exterior		NO	-	-	NO
		UNIONES				
1 MM	Unión entre paneles - muro		SI	SI	SI	SI
1 FF	Unión entre paneles - forjado		SI	SI	SI	SI
1 MF	Unión entre muro y forjado		SI	SI	SI	SI
1 VMF	Unión entre viga, muro y forjado		NO	-	-	NO
1 VPF	Unión entre viga, pilar y forjado		NO	-	-	NO
1 ML	Unión entre muro y losa de cimentación		SI	SI	SI	SI
1 PL	Unión entre pilar y losa de cimentación		SI	SI	SI	SI

Figura 15. Selección de intervenciones a evaluar. Biblioteca Gabriel García Márquez en Barcelona de SUMA Arquitectura. Elaboración propia.

SELECCIÓN DE INTERVENCIONES A EVALUAR						
CÓDIGO		INTERVENCIÓN	¿INTERVIENE EN EL PROYECTO?	¿HAY INFO?	¿CON CLT?	¿SE EVALUARÁ?
CASO DE ESTUDIO	DETALLE		SI/NO			
		Cubiertas				
3 C		Cubiertas	SI	SI	NO	NO
		Fachada y particiones				
3 FA		Fachadas	SI	SI	SI	SI
		Estructuras				
3 FI		Forjado interior	SI	SI	SI	SI
3 FE		Forjado exterior	NO	-	-	NO
		UNIONES				
3 MM		Unión entre paneles - muro	SI (X2)	SI (X2)	SI (X2)	SI (X2)
3 FF		Unión entre paneles - forjado	SI	SI	SI	SI
3 MF		Unión entre muro y forjado	-	-	-	NO
3 VMF		Unión entre viga, muro y forjado	SI	SI	SI	SI
3 VPF		Unión entre viga, pilar y forjado	NO	-	-	NO
3 ML		Unión entre muro y losa de cimentación	NO	-	-	NO
3 PL		Unión entre pilar y losa de cimentación	NO	NO	NO	NO

Figura 16. Selección de intervenciones a evaluar. Viviendas de CLT con fachada de madera carbonizada en Madrid de b720 Fermín Vázquez Arquitectos. Elaboración propia.

SELECCIÓN DE INTERVENCIONES A EVALUAR						
CÓDIGO		INTERVENCIÓN	¿INTERVIENE EN EL PROYECTO?	¿HAY INFO?	¿CON CLT?	¿SE EVALUARÁ?
CASO DE ESTUDIO	DETALLE					
		Cubiertas	SI/NO			
2 C	Cubiertas		SI	NO	-	NO
		Fachada y particiones				
2 FA	Fachadas		SI	SI	SI	SI
		Estructuras				
2 FI	Forjado interior		SI	SI	SI	SI
2 FE	Forjado exterior		SI	SI	SI	SI
		UNIONES				
2 MM	Unión entre paneles - muro		SI	NO	SI	NO
2 FF	Unión entre paneles - forjado		SI	NO	SI	NO
2 MF	Unión entre muro y forjado		SI	NO	SI	NO
2 VMF	Unión entre viga, muro y forjado		-	-	-	NO
2 VPF	Unión entre viga, pilar y forjado		SI	SI	SI	SI
2 ML	Unión entre muro y losa de cimentación		SI	SI	SI	SI
2 PL	Unión entre pilar y losa de cimentación		SI	SI	SI	SI

Figura 17. Selección de intervenciones a evaluar. 85 viviendas sociales en Cornellà, Barcelona de Peris+Toral Arquitectes. Elaboración propia.

Evaluación de los casos de estudio

Cada elemento será evaluado en una escala del 1 al 4 según su desempeño en cada criterio. Esta puntuación se multiplica por el coeficiente de ponderación correspondiente, obteniendo una puntuación que reflejará tanto el rendimiento del elemento en cada criterio como la prioridad del criterio evaluado.

Comenzamos con los forjados de los proyectos de SUMA Arquitectura (Fig. 17) y Peris+Toral Arquitectes (Fig. 18). El principal problema en ambos casos es la resolución del problema de la acústica, que resuelven aplicando una capa de hormigón. Esta solución, aunque efectiva impide que los elementos funcionen de forma independiente, lo que no permite realizar un desmontaje correcto sin daño a los materiales adyacentes y sin producir una gran cantidad de residuos. También impide el acceso a las uniones del forjado. Por muy reversibles que sean las uniones si no se puede acceder a ellas el sistema no podrá ser desmontado correctamente. Se podría haber optado por dejar un cajeado o canaletas entre juntas para facilitar la accesibilidad a las uniones, pero no resolvería el problema de la falta de independencia. El uso de esta capa de hormigón tiene como consecuencia que los forjados presenten una desmontabilidad bastante menor que otros elementos, como las fachadas. Esto se repite en los tres casos de estudio.

En el caso de las uniones se toman las uniones entre paneles forjado de la biblioteca de SUMA Arquitectes (Fig. 19) y de las viviendas de b720 Fermín Vázquez Arquitectos (Fig.20). En el primer caso “ocultamos todos los encuentros, todas las uniones. Cuando se ve una unión, ha sido porque por mucho que le hemos dado vueltas ya no nos ha quedado más remedio que mostrar una pletina o unos tornillos” (Tectónica, 2024). Lo ocultan mediante una tapa pegada con adhesivo. En el segundo no se preocupan por ocultar estos encuentros y uniones, pero si utilizan una cinta butílica biadhesiva. En ambos casos se termina perdiendo la independencia entre los componentes, se limita la reusabilidad de los elementos que quedarán impregnados de adhesivo y se generará residuos al perderse tanto la tapa como la cinta butílica.

Por último se incluyen las tablas resumen de las evaluaciones de todos los elementos y uniones de los tres casos de estudio. (Fig. 21), (Fig. 22) y (Fig. 23).

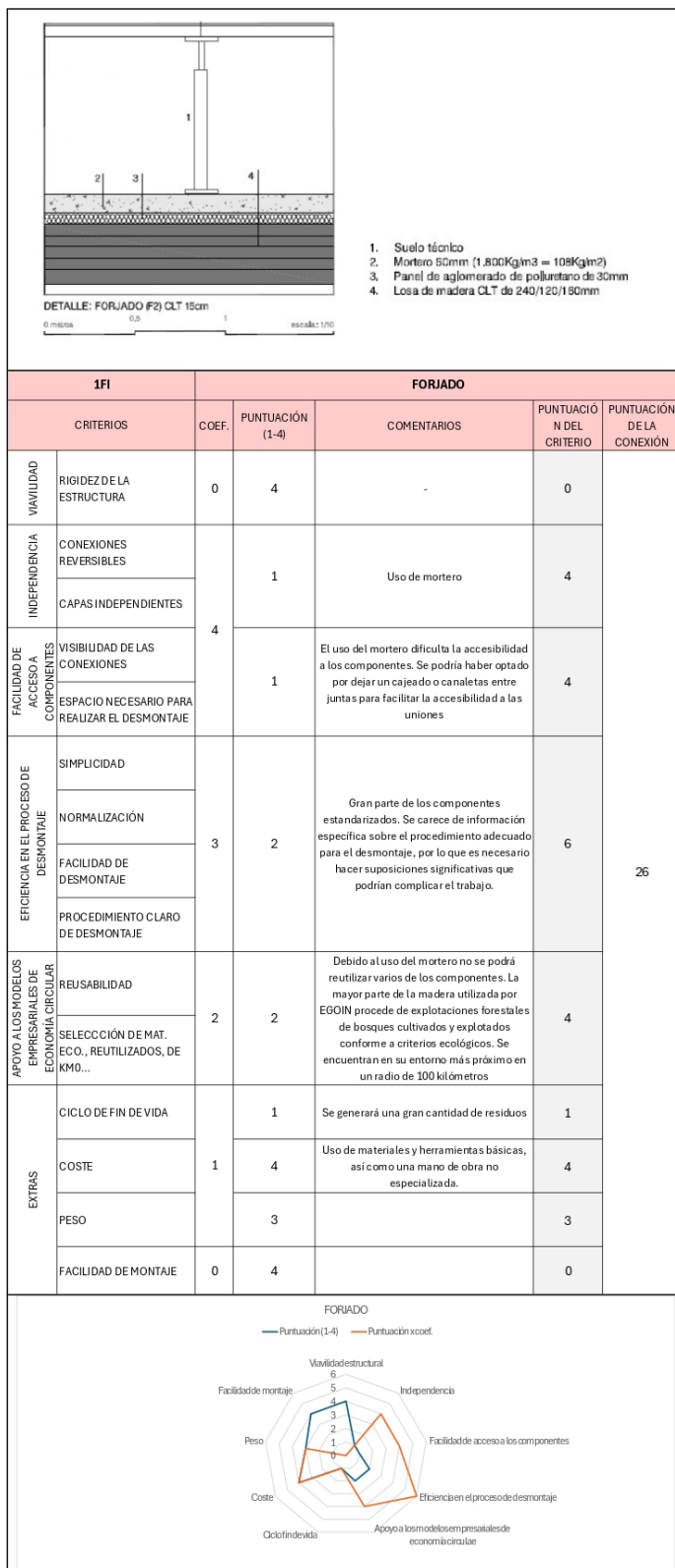


Figura 17. Tabla evaluación del forjado. Biblioteca Gabriel García Márquez en Barcelona de SUMA Arquitectura. Elaboración propia.

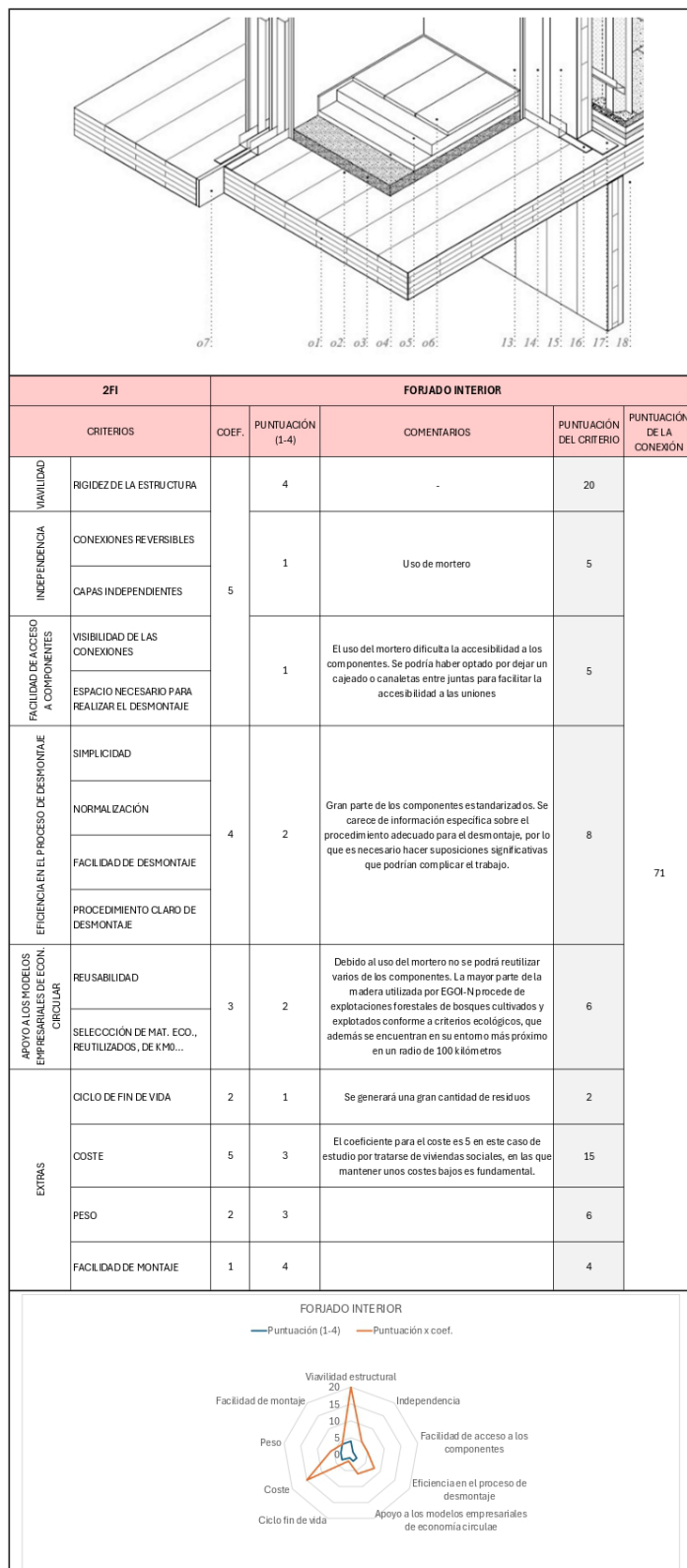


Figura 18. Tabla evaluación del forjado. 85 viviendas sociales en Cornellà, Barcelona de Peris+Torral Arquitectes. Elaboración propia.

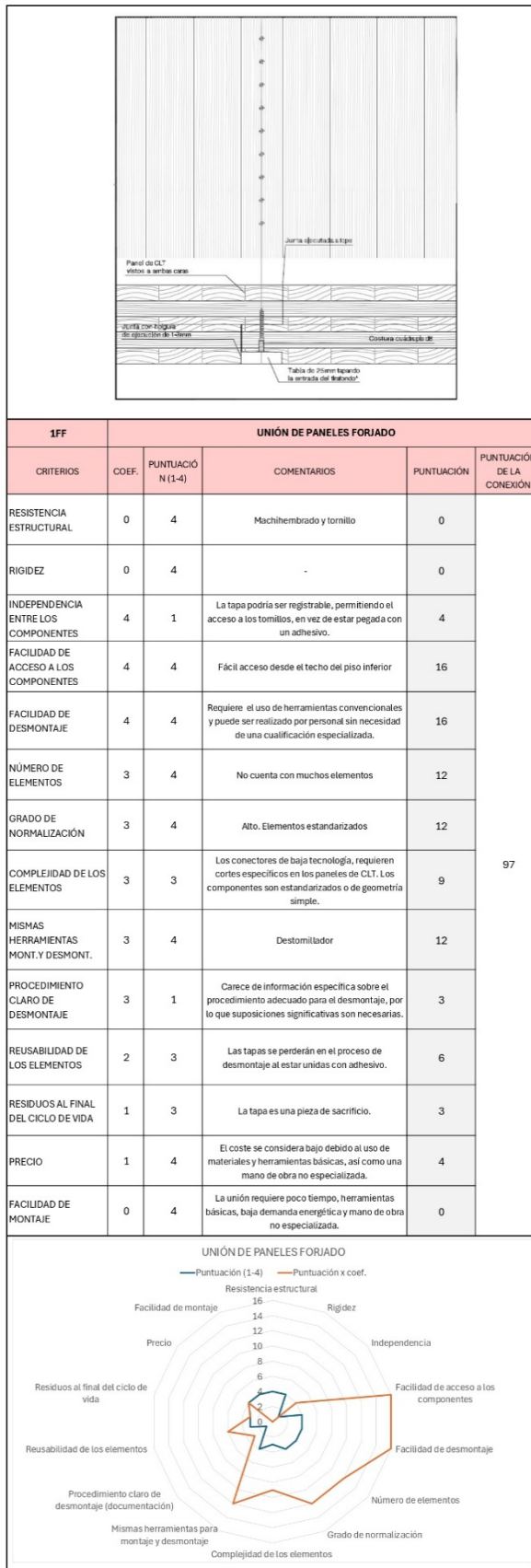


Figura 19. Tabla evaluación de unión entre paneles forjado. Biblioteca Gabriel García Márquez en Barcelona de SUMA Arquitectura. Elaboración propia.

Figura 20. Tabla evaluación de unión entre paneles forjado. Viviendas de CLT con fachada de madera carbonizada en Madrid de b720 Fermín Vázquez Arquitectos. Elaboración propia.



CONCLUSIONES

Figura 21. Tabla resumen evaluación elementos y uniones de Biblioteca Gabriel García Márquez en Barcelona de SUMA Arquitectura. Elaboración propia.

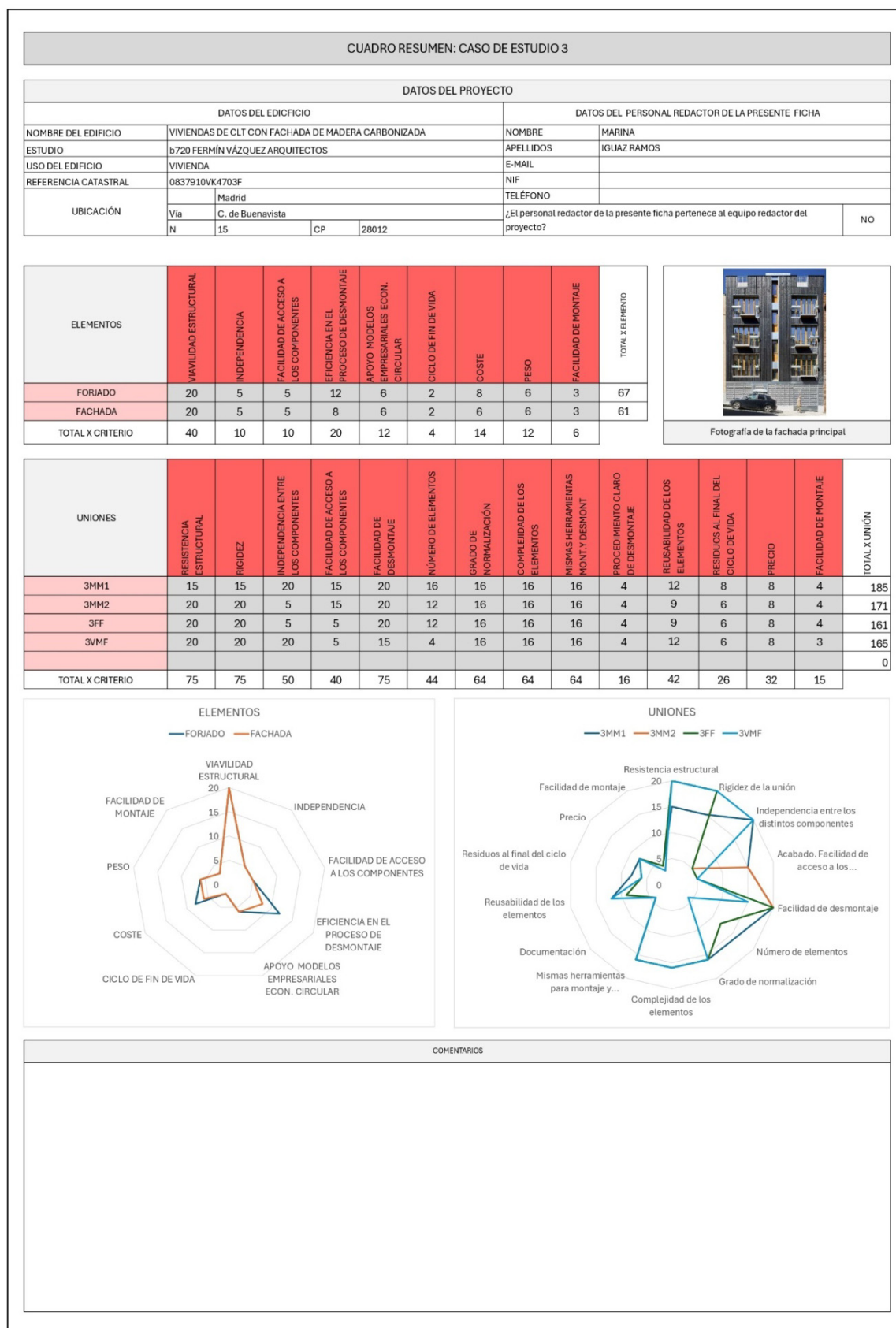


Figura 22. Tabla resumen evaluación elementos y uniones de las viviendas de CLT con fachada de madera carbonizada en Madrid de b720 Fermín Vázquez Arquitectos. Elaboración propia.

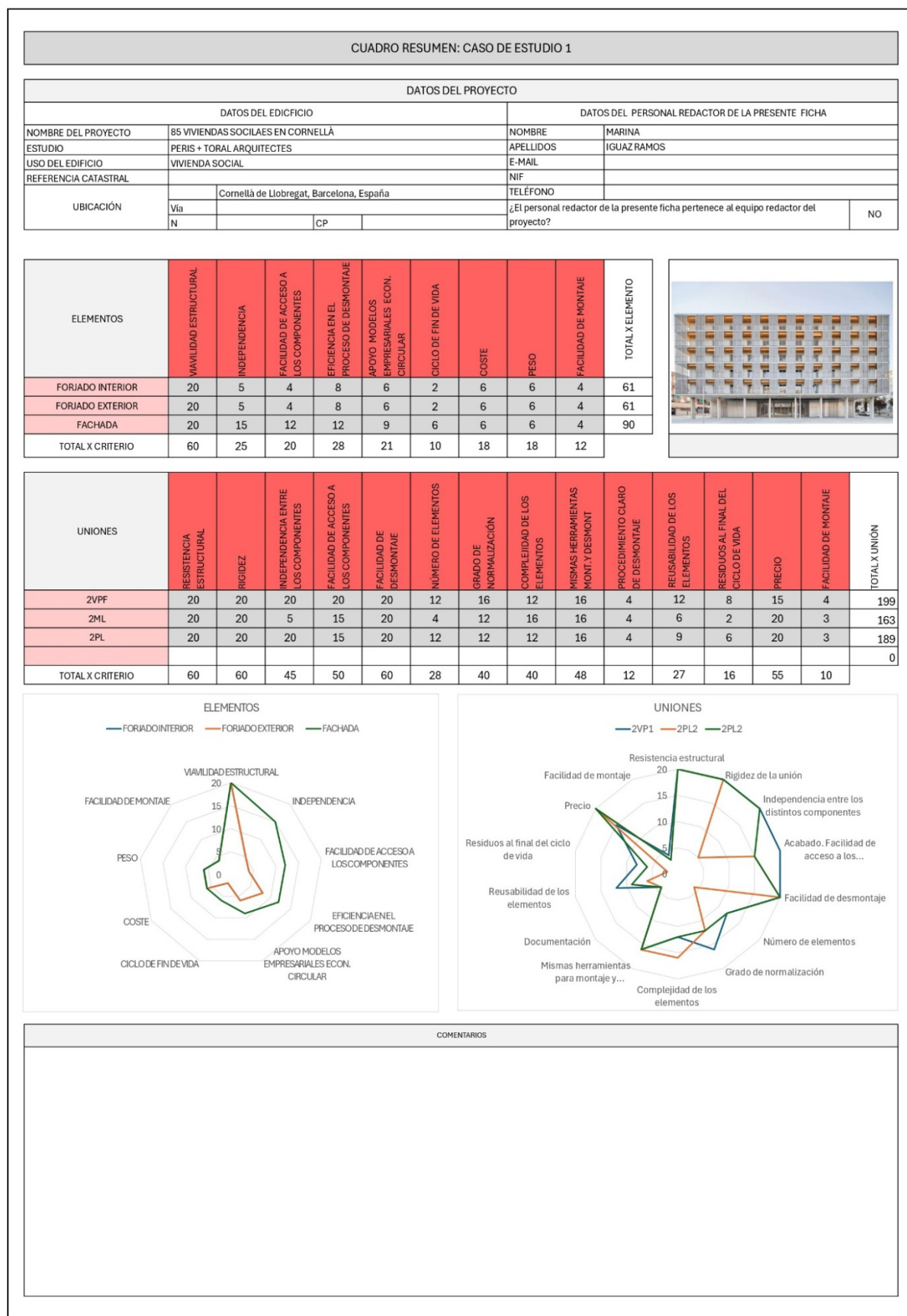


Figura 23. Tabla resumen evaluación elementos y uniones de las 85 viviendas sociales en Cornellà, Barcelona de Peris+Toral Arquitectes. Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Resultados de la aplicación de la metodología propuesta

Tras evaluar todos los elementos y uniones de los tres casos de estudio se concluye que la construcción con paneles de madera contralaminada (CLT) presenta características especialmente favorables para el Diseño para el Desmontaje (DfD). Entre sus fortalezas, destaca la ligereza del material, que no solo facilita las operaciones de montaje y manipulación en obra, sino que también reduce las demandas estructurales sobre la cimentación, disminuyendo así la cantidad de hormigón requerida y, en consecuencia, el impacto ambiental asociado. Asimismo, el sistema constructivo basado en componentes normalizados, prefabricados y tecnologías sencillas favorece procedimientos de ensamblaje y desmontaje rápidos y accesibles para personal no especializado.

No obstante, el empleo de CLT en el marco del DfD presenta puntos críticos derivados de soluciones constructivas estándar que afectan directamente a la independencia y recuperabilidad de los elementos. En primer lugar, la mejora del confort acústico en forjados suele requerir una capa de hormigón, que impide el acceso a las uniones y reduce significativamente la desmontabilidad. De forma similar, la protección contra el fuego en muros y techos se resuelve habitualmente mediante placas de yeso, cuyo desmontaje genera residuos y compromete la integridad de los elementos protegidos. A estos inconvenientes se suma la falta de documentación técnica específica sobre procesos de desmontaje, la necesidad de elementos adhesivos, como las cintas butílicas, y la presencia de decisiones proyectuales dominadas por criterios estéticos, que tienden a ocultar uniones y dificultar su accesibilidad.

Con el fin de avanzar hacia un uso del CLT plenamente compatible con estrategias circulares, se identifican diversas líneas de desarrollo futuro. Resulta prioritario investigar soluciones de diseño basadas en capas secas, desmontables o registrables, especialmente en forjados y muros, para evitar la dependencia entre capas resultante de la utilización de morteros y recubrimientos no reversibles. Asimismo, debe incorporarse de manera sistemática la evaluación de la desmontabilidad, tanto de los elementos como de sus uniones, desde el inicio del proceso de diseño, evitando decisiones que prioricen la estética en detrimento de la accesibilidad, la reversibilidad y la futura reutilización de los componentes.

Metodología propuesta

Uno de los principales valores añadidos de esta metodología es su capacidad de adaptación a distintas tipologías y objetivos. La importancia relativa de cada criterio puede variar significativamente según el tipo de proyecto. Por ejemplo, el coste adquiere un peso muy diferente en el proyecto del estudio b720 Fermín Vázquez Arquitectos, donde según sus palabras, «a pesar de todo, tanto el promotor como nosotros hemos intentado ir un poco más allá de lo que quizá los números estrictamente harían recomendable,» (Tectónica, 2025) que en las viviendas de protección oficial diseñadas por Peris+Toral Arquitectes. En lugar de imponer valores absolutos, la herramienta ofrece una metodología estructurada que permite flexibilidad y la toma de decisiones ajustadas a las particularidades de cada proyecto.

Además, los resultados obtenidos con la herramienta se muestran coherentes con la lógica del diseño para el desmontaje, reforzando su validez, y representa un avance metodológico en la evaluación de estrategias de DfD para la edificación con madera, un campo aún en desarrollo, promoviendo prácticas más sostenibles en el sector de la construcción. Asimismo, podría resultar útil en fases tempranas de diseño, orientando decisiones para favorecer soluciones más sostenibles y flexibles, lo cual aporta valor a arquitectos e ingenieros en la toma de decisiones.

Aunque se utiliza un método estructurado como el AHP, el proceso de toma de decisiones se inclina más hacia lo cualitativo que hacia lo cuantitativo, por lo que los resultados dependerán en gran medida del criterio, conocimiento y experiencia de la persona evaluadora. La objetividad al abordar la toma de decisiones será crucial. Para mejorar la validez del proceso, se podría involucrar múltiples tomadores de decisiones con distintos perfiles.

El uso inicial de coeficientes de ponderación cero generó confusión visual y metodológica, la utilización de esta herramienta por profesionales con experiencia y conocimientos específicos permitiría ajustar los coeficientes de ponderación, para reflejar con mayor precisión las prioridades de cada intervención y una puntuación posiblemente más acorde con las realidades de la construcción, reduciendo la incertidumbre detectada durante este estudio.

Por último, como medida para mejorar la herramienta, se propone la introducción de unos baremos de interpretación que permitan una lectura más clara y objetiva de los resultados obtenidos y permitan determinar si se ha alcanzado el objetivo del diseño para el desmontaje. Actualmente, aunque es posible identificar qué elementos presentan un mayor potencial de desmontabilidad en comparación con otros,

no existe una referencia clara que indique si dicho potencial puede considerarse alto, medio, bajo o nulo. La inclusión de estos rangos facilitaría una evaluación más precisa y comprensible del desempeño de cada componente.

Finalmente, se recomienda desarrollar una interfaz más automatizada o digital, que facilite su uso, reduzca errores humanos y mejore su integración en procesos de diseño y análisis más amplios.

Referencias

Forcada Matheu, N. (2024). *Los edificios como bancos de materiales*. Grupo construcia.

[2 de junio de 2025] <https://www.grupoconstrucia.com/index.php/los-edificios-como-bancos-de-materiales/>

GBCe. (2021). *Economía circular en la edificación*.

[2 de junio de 2025] https://gbce.es/documentos/Informe_Economia-Circular.pdf

Guy, B., y Ciarimboli, N. (2008). *DfD Design for Disassembly in the Built Environment: A Guide to Closed-Loop Design and Building*. [2 de junio de 2025] <https://www.lifecyclebuilding.org/docs/DfDseattle.pdf>

Laasonen, S., y Pajunen, S. (2023). *Assessment of Load-Bearing Timber Elements for the Design for Disassembly. Buildings*. [2 de junio de 2025] <https://doi.org/10.3390/buildings13071878>

Parlamento Europeo. [25 de marzo de 2024]. *El trabajo de la UE para la gestión sostenible de residuos*. [2-6-2025]

https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2018/4/story/20180328STO00751/20180328STO00751_es.pdf

Pozzi, L. E. (2019). *Design for Disassembly with Structural Timber Connections— Analysis and Assessment of Different Connection Systems Used in Engineered Timber Building Structures to Maximise Demountability and Reuse of the Elements* [Faculty of Architecture & the Built Environment, Delft University of Technology Julianalaan]. [23 de mayo de 2025]. https://repository.tudelft.nl/file/File_b91e4fc3-f7f1-4d5d-acae-4c2d37178dbe

Tectónica. (2024). *Biblioteca Gabriel García Márquez en Barcelona / SUMA Arquitectura*. [23 de mayo de 2025] <https://tectonica.archi/madera/proyectos/biblioteca-gabriel-garcia-marquez-en-barcelona-de-suma-arquitectura-madera/>

Tectónica. (2025). *Viviendas de CLT con fachada de madera carbonizada / b720 Fermín Vázquez Arquitectos*. [23 de mayo de 2025] <https://tectonica.archi/madera/proyectos/viviendas-de-clt-con-fachada-de-madera-carbonizada-de-b720-fermin-vazquez-arquitectos-madera/>

UNE-ISO 20887; *Sostenibilidad en edificios y obras de ingeniería civil Diseño para el desmontaje y la adaptabilidad Principios, requisitos y directrices*. (2023).

Rehabilitación de cubiertas de viviendas sociales en clima mediterráneo mediante baldosas fabricadas con PET incorporado: análisis de ciclo de vida económico y energético.

Retrofitting of social housing roofs in a Mediterranean climate using tiles manufactured with incorporated PET: economic and energy life-cycle analysis.

HELENA DOMÍNGUEZ TORRES/ Universidad de Sevilla

CARLOS A.DOMÍNGUEZ TORRES/ Universidad de Sevilla

Palabras clave Keywords

Reciclaje de PET, vivienda social, análisis de costes de ciclo de vida, ahorro energético.

PET recycling, social housing, life cycle cost analysis, energy savings.

Resumen

El presente trabajo analiza el comportamiento energético del uso de tejas de cemento fabricadas con incorporación de residuos de PET para la rehabilitación de cubiertas de viviendas sociales en un clima mediterráneo cálido. Para ello, se compara el flujo energético anual a través de la cubierta de una vivienda arquetípica del parque de vivienda social construida en el sur de España a mediados del siglo XX con el flujo anual resultante tras la intervención mediante este tipo de tejas con PET incorporado.

Asimismo, se realiza un análisis del coste del ciclo de vida durante el periodo útil de las tejas estudiadas, con el objetivo de evaluar la viabilidad económica de su aplicación en proyectos de rehabilitación.

Como resultado de la investigación, se ha constatado que la adopción de tejas con residuos de PET mejora consistentemente el aislamiento térmico, reduciendo el flujo total de calor anual a través de la cubierta, lo cual se traduce en una mejora significativa de las condiciones de habitabilidad interior, especialmente durante la temporada cálida. Paralelamente, se demuestra su viabilidad económica gracias a una disminución significativa en los costes totales

del ciclo de vida, incluyendo tanto los costes de instalación como los operativos.

Abstract

This study analyses the energy performance of cement tiles manufactured with PET waste for the renovation of social housing roofs in a warm Mediterranean climate. To this end, the annual energy flow through the roof of an archetypal social housing unit built in southern Spain in the mid-20th century is compared with the annual flow resulting from the use of these types of tiles incorporating PET.

An analysis of the life cycle cost during the useful life of the tiles studied is also carried out, with the aim of assessing the economic viability of their application in renovation projects.

The research has found that the use of tiles containing PET waste consistently improves thermal insulation, reducing the total annual heat flow through the roof, which translates into a significant improvement in indoor living conditions, especially during the hot season. At the same time, their economic viability has been demonstrated thanks to a significant reduction in total life-cycle costs, including both installation and operating costs.

Introducción

El tereftalato de polietileno (PET), ampliamente conocido por su uso en botellas y envases, se ha consolidado en los últimos años como una materia prima alternativa en la industria de la construcción. Gracias a sus propiedades mecánicas, su resistencia a la humedad y su bajo peso, el PET reciclado ofrece soluciones sostenibles para la fabricación de aislamientos térmicos y acústicos, paneles decorativos, tejas y otros elementos constructivos. Este aprovechamiento no solo permite recuperar cantidades de PET que no cumplen con los exigentes estándares alimentarios, sino que además contribuye a reducir la huella ambiental del sector, promoviendo la economía circular y disminuyendo la dependencia de materias primas vírgenes. Así, entre los diversos tipos de residuos sólidos generados en grandes cantidades en la sociedad actual, el PET (tereftalato de polietileno) presenta un notable potencial dentro de la economía circular para su reciclaje y reutilización, ya que los materiales elaborados con PET reciclado ofrecen una excelente durabilidad mecánica y química, bajo peso, estabilidad dimensional durante su manipulación y una alta resistencia al impacto de sustancias agresivas.

Según un informe reciente de Zerowaste Europe (2022), se estima que a nivel europeo se alcanza una tasa de reciclaje aproximada del 23% para todo el PET puesto en el mercado (POM, por sus siglas en inglés). Esta cifra se debe principalmente a la baja tasa de reciclaje del PET procedente de fuentes distintas a las botellas. Por otro lado, dicho informe señala que los países europeos logran una tasa media de recogida de aproximadamente el 60% de las botellas de PET POM, con una tasa de reciclaje estimada del 50%. El informe concluye que el sistema del PET no es actualmente muy circular y presenta una elevada tasa de pérdida de aproximadamente el 75% del PET POM.

En resumen, a partir de este informe puede afirmarse que, aunque se reutiliza un porcentaje moderado del 23% de todo el PET POM, el 77% no se recicla, lo que inevitablemente conduce a su acumulación en vertederos, incineración, dispersión en la naturaleza y, en general, a la generación de un grave problema ambiental y de salud pública.

Esta situación abre la posibilidad de aprovechar el material en otros sectores, como el de la construcción, donde la calidad exigida al PET triturado al final de la cadena de reutilización no es tan estricta como la requerida para su uso convencional como envase. Por consiguiente, su incorporación en materiales de construcción constituye una oportunidad valiosa para revalorizar las fracciones de PET reciclado que no cumplen las especificaciones del envasado, ampliando así la circularidad y sostenibilidad del material.

En este trabajo se evalúa el comportamiento energético de la rehabilitación de cubiertas de viviendas sociales en un clima mediterráneo cálido, mediante el uso de tejas de cemento fabricadas con residuos de PET reciclado. El análisis compara el flujo energético anual a través de la cubierta de una vivienda representativa del parque de vivienda social de mediados del siglo XX en el sur de España, antes y después de la rehabilitación con estas tejas modificadas con PET. Este parque de viviendas se caracteriza por la ausencia de medidas de aislamiento térmico en la envolvente, lo que las hace extremadamente vulnerables a los efectos del clima exterior.

El objetivo de este trabajo es evaluar la capacidad de rehabilitación de la cubierta de la vivienda social analizada para mejorar su comportamiento energético y, de este modo, reducir su consumo energético mediante el uso de tejas de cemento fabricadas con residuos de PET reciclado. Con ello se busca mejorar las condiciones de habitabilidad de los inquilinos y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, obteniendo además el beneficio adicional de retirar del entorno natural el PET utilizado en la fabricación de las tejas.

Asimismo, el trabajo analiza la viabilidad económica de la propuesta de rehabilitación mediante un análisis de costes del ciclo de vida durante la vida útil de las tejas consideradas. El propósito de este análisis es evaluar si los costes de la rehabilitación se compensan con los costes operativos y si existe una mejora en los costes totales en comparación con la vivienda de referencia inicial.

Metodología

Caso de estudio

El caso de estudio considerado corresponde a una vivienda situada en una promoción de vivienda social conocida como *El Plantinar*, ubicada en la ciudad de Sevilla, al sur de España. Construida en la década

de 1960, estas viviendas se caracterizan por una envolvente térmica deficiente y obsoleta, que las hace altamente vulnerables a las condiciones climáticas. Los edificios presentan cubiertas planas de igual altura (Figura 3, Izqda). La vivienda objeto de estudio se encuentra en la última planta, directamente expuesta a la transmisión de calor a través de la cubierta (Figura 3, Dcha), y cuenta con una superficie total de 68 m².

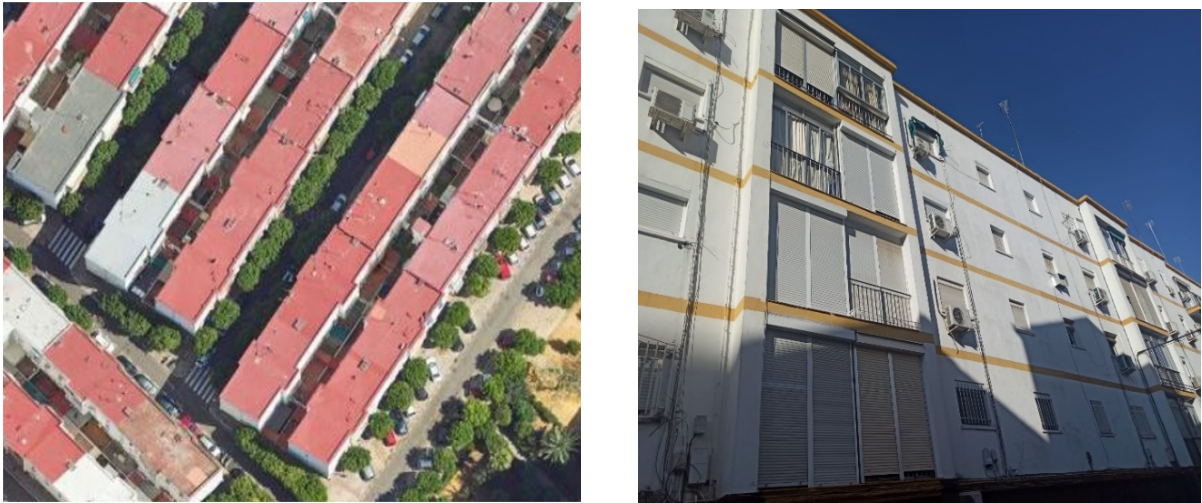


Figura 1. Izqda: Vista aerea del barrio el Plantinar (Fuente: Google Earth). Dcha: Edificio caso de estudio (Fuente: autor)

Las tablas 1 y 2 muestran los detalles constructivos de las paredes y de la cubierta, respectivamente, del edificio de referencia en su estado original.

Tabla 1: Descripción de los muros de la vivienda caso estudio.

Layer	Description	Thickness (m)	Density (kg/m ³)	Specific Heat (J/kg K)	Conductivity (W/m K)
1(Ext)	Cement rendering	0.015	1300	1000	0.67
2	Perforated brick	0.115	780	1000	0.35
3	Cement rendering	0.010	1300	1000	0.67
4	Air chamber	0.05	1.184	1007	0.0255
5	Hollow brick	0.04	770	1000	0.32
6 (Int)	Plastering	0.015	1000	1000	0.57

Tabla 2: Descripción de la cubierta de la vivienda caso estudio.

Layer	Description	Thickness (m)	Density (kg/m ³)	Specific Heat (J/kg K)	Conductivity (W/m K)
1(Ext)	Bituminous paint	0.0015	1150	1000	0.23
2	Ceramic Tiles	0.005	2000	800	1.00
3	Mortar	0.01	2000	1000	1.40
4	Protective Layer	0.015	1150	1000	0.23
5	Mortar	0.01	2000	1000	1.40
6	Carbon cinders	0.1	640	657	1.40
7	Concrete vault	0.22	1330	1000	1.32
8 (Int)	Plastering	0.01	1000	1000	0.32

Los valores mostrados en las Tablas 1 y 2 han sido obtenidos del CTE (2023) y Fernández Díaz (2019). Todas las ventanas y la puerta acristalada están equipadas con vidrio de 3 mm de espesor, marcos de aluminio y persianas de lamas de PVC.

Para la cubierta del caso de referencia, se asumieron un coeficiente de absorción de radiación solar de 0,8 y una emisividad térmica de 0,9, valores consistentes con los típicos de pinturas bituminosas oscuras (Fernández Díaz, 2019).

Descripción de la rehabilitación de la cubierta

La rehabilitación de la cubierta de la vivienda social bajo consideración (el caso de referencia) se realiza sustituyendo las tejas de la cubierta inicial por una capa de tejas de cemento con incorporación de escamas de PET. Siguiendo a Callejas et al. (2025), el proceso de fabricación de las tejas incluye escamas de PET de tamaño comprendido entre 0,15 y 2,36 mm, con una masa específica de 1,33 g/cm³. El PET reemplaza el 15% de la arena en masa, sustituyendo efectivamente esa fracción de arena en el proceso de producción.

La Tabla 3 muestra las propiedades físicas y ópticas de las tejas de hormigón con PET incorporado, según los resultados presentados en el artículo mencionado de Callejas et al.

Tabla 3. Propiedades termofísicas y óptics de las tejas (valores medios).

Material	Grosor (m)	Densidad (kg/m³)	Calor específico (J/kg K)	Conducti- vidad (W/m K)	Reflectividad Solar	Emisividad
Teja con PET	0.02	2114	818	1.401	0.2213	0.9183

Según el análisis mecánico realizado en el citado trabajo de Callejas et al, la teja de hormigón con PET incorporado cumple con los requisitos estándar de propiedades mecánicas para aplicaciones en cubiertas.

En lo referente a su vida útil, dado que presenta buena resistencia mecánica y química, se espera una vida útil cercana a la de las tejas tradicionales, alrededor de 30 a 50 años, siempre que se mantenga la proporción adecuada (≤15 % de sustitución) y se eviten excesos de agrietamiento o deformación. Así en el estudio realizado en (Omosebi y Abas, 2021) se concluye que con una proporción adecuada de PET (≤ 30 %) sustituyendo a la arena, el material cumple con estándares de resistencia a largo plazo similares al hormigón tradicional. Por ello, en el presente estudio tomamos un valor medio de 40 años de vida útil para las tejas con PET.

Marco climático

Según datos de la Agencia Estatal de Meteorología de España, Sevilla presenta una temperatura media anual de 19,2 °C. Durante los meses de julio y agosto, las temperaturas máximas promedio pueden alcanzar y superar los 40 °C, mientras que en enero la temperatura mínima promedio desciende a 5,7 °C.

En consecuencia, los inviernos son relativamente suaves, mientras que los veranos son notablemente calurosos y secos, con altos niveles de radiación solar. El valor máximo diario promedio de radiación solar incidente normal se registra en julio con 8,3 kWh/m², mientras que el valor promedio más bajo de 2,3 kWh/m² se observa en diciembre.

Teniendo en cuenta los valores meteorológicos descritos, el clima de la región se clasifica como mediterráneo Csa según la clasificación climática de Köppen-Geiger. Para este estudio, se utilizó el archivo climático de Sevilla proveniente de la base de datos de archivos climáticos de EnergyPlus.

Análisis Energético

La zona interior bajo la cubierta se consideró como zona test (Saafi, 2018). La temperatura del aire interior se modeló como un valor único. Se consideró una ventilación natural de 1 renovación de aire por hora cuando las temperaturas exteriores fueran adecuadas y se asumió una tasa de infiltración de 0,3 renovaciones de aire por hora, de acuerdo con investigaciones previas.

El edificio fue modelado utilizando EnergyPlus calculándose el flujo de calor horario para un año típico a partir del archivo climático EPW de Sevilla.

El flujo de calor horario se calculó para el caso de referencia, para el caso rehabilitado utilizando tejas con un 15 % de PET incorporado, y para el caso rehabilitado con tejas que incorporan un 15 % de PET y están pintadas con pintura reflectante (cool paint).

Metodología para el Analisis de Costes del Ciclo de Vida

Basado en el referido trabajo de Omosebi y Abas (2021), en el presente estudio para el análisis de costes del ciclo de vida, se tomó un valor promedio de 40 años de vida útil para las tejas de hormigón consideradas con PET incorporado.

En el caso de la solución de rehabilitación que incorpora la pintura reflectante, se considera una vida útil de 10 años para esta pintura, que corresponde a la vida útil promedio según la ficha técnica comercial del fabricante.

El análisis de costos del ciclo de vida (LCCA) realizado se basa en el método P1-P2 introducido por Duffie y Beckman (2006). Para llevar a cabo este análisis se consideran las siguientes variables:

- los costes de energía,
- el rendimiento del equipo utilizado para aire acondicionado,
- el coste inicial de aplicación de los materiales,
- los costes de mantenimiento,

así como las variables económicas que impulsan el proceso económico: la inflación de los costes energéticos i y la tasa de descuento monetaria d .

Si $P_{e,C}$ y $P_{e,H}$ son los precios actuales para los precios de la energía para calefacción, respectivamente, e i es la tasa de inflación para los precios de la energía, y d es la tasa de descuento, el valor presente de cualquier pago $C_e(k)$ en el periodo k viene dado por:

$$PW_k(C_e(k)) = C_e(k)/(1+d)^k$$

donde

$$C_e(k) = \left(\frac{Q_c(k) \times P_{e,C}}{SEER \times 3.6 \times 10^6} + \frac{Q_H(k) \times P_{e,H}}{SCOP \times 3.6 \times 10^6} \right) (1+i)^{k-1}$$

siendo

- **SEER** y **SCOP** los coeficientes de eficiencia estacional para el rendimiento energético para enfriamiento y calefacción del equipo de acondicionamiento.
- $Q_c(k)$ y $Q_H(k)$ los consumos energéticos para refrigeración y calefacción para el año k .

Entonces, para un periodo de tiempo de vida útil $n=40$, el valor presente del coste energético para el periodo de tiempo completo de ciclo de vida considerado es:

$$C_{(e)} = \sum_{k=1}^n PW_k(C_e(k))$$

Entonces, el valor presente del coste total del ciclo de vida por unidad de área de la superficie del techo se expresa como:

$$C_{(T)} = C_{(e)} + C_{(I)} + C_{(M)}$$

donde $C_{(I)}$ es el coste de la inversión inicial para instalar la solución de rehabilitación y $C_{(M)}$ son los costes de mantenimiento durante todo el período del ciclo de vida.

En comparación con la cubierta del edificio de referencia, el caso rehabilitado producirá variaciones anuales en el consumo de energía, junto con los impactos financieros correspondientes, impulsados principalmente por cambios en los costes relacionados con la energía y en el consumo de la misma.

Para calcular la diferencia entre el gasto económico para el caso rehabilitado y el de referencia, se calcula el Ahorro Neto (NS) para todo el período del ciclo de vida:

$$NS = C_{(T)}^{ref} - C_{(T)}$$

donde $C_{(T)}^{ref}$ y $C_{(T)}$ son el valor presente del coste total del ciclo de vida por unidad de área de cubierta de referencia y del techo rehabilitado, respectivamente. Entonces, si:

$NS > 0 \rightarrow$ **se tienen ahorros económicos positivos o reales.**

Un valor positivo de NS significa que el uso del recubrimiento frío produce ahorros económicos con respecto al caso de referencia.

Las variables consideradas para realizar los cálculos económicos involucrados en el LCCA se enumeran en la Tabla 4.

Variable	Valor	Unidad
Tejas con Pet: instalación y fabricación	43	€/m ²
Coste electricidad	0.2403	kWh
Tasa de inflación de la energía (<i>i</i>)	3	%
Tasa de descuento (<i>d</i>)	1.5	%
Vida útil tejas con Pet	40	Años
Pintura fría: instalación y fabricación	9.5	€/m ²
Vida útil de la pintura fría	10	Años

Tabla 4. Variables utilizadas en el análisis de costes para el ciclo de vida LCCA.

Todos los valores incluidos en la tabla se han obtenido promediando valores procedentes de la literatura especializada, fabricantes, Eurostat de la UE y el Generador de Precios de la Construcción de CYPE Ingenieros.

Resultados

Análisis energético

La Figura 2 muestra las cargas mensuales de calefacción y refrigeración para el caso de referencia y el caso reacondicionado con tejas de cemento mezcladas con PET (TilPet) para un año típico en la ciudad de Sevilla. Como puede observarse en la figura, las cargas en los meses fríos son mayores para el caso reacondicionado, mientras que en los meses cálidos ocurre justo lo contrario. Esto puede deberse a la mayor reflectividad solar que presentan las tejas con PET en comparación con la superficie del tejado de referencia, debido principalmente a la presencia de escamas de PET (Callejas et al., 2025).

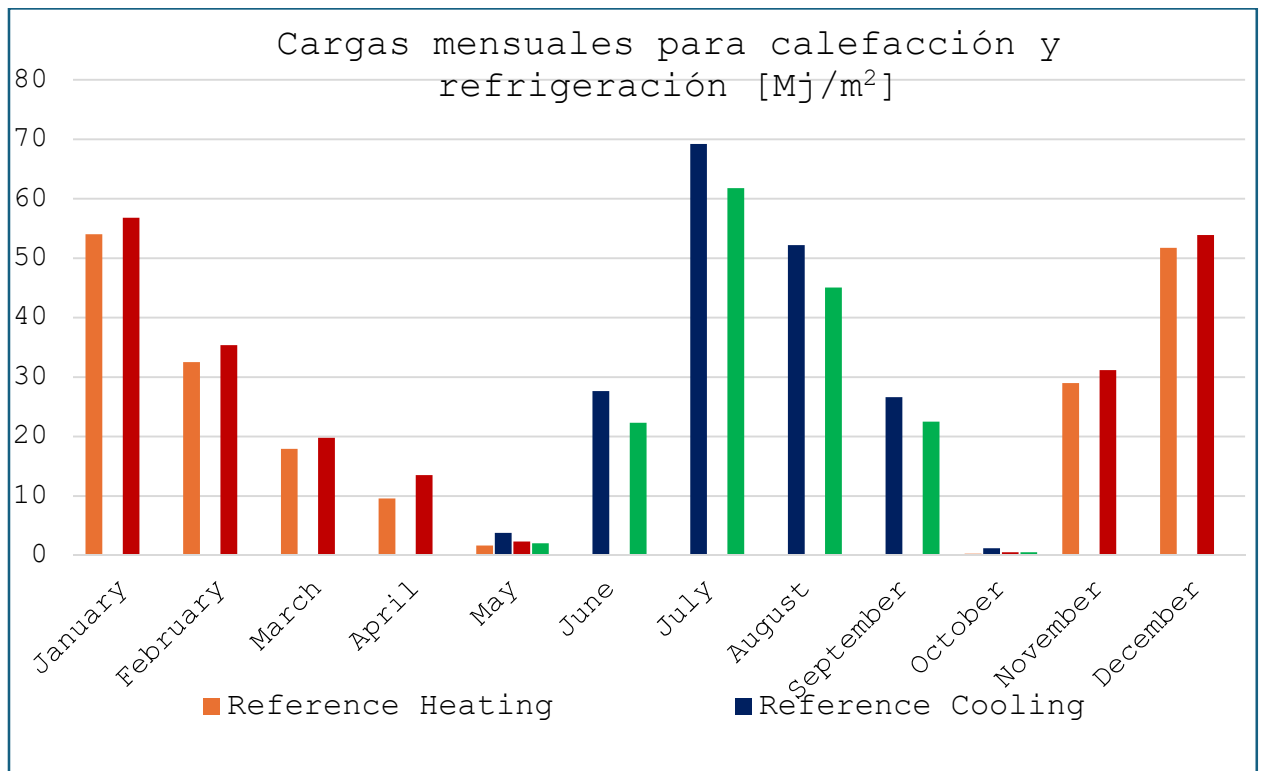


Figura 2. Cargas mensuales de calefacción y refrigeración para los casos de referencia y el rehabilitado.

En la Figura 3 se muestran las cargas totales para el caso de referencia y el caso renovado con tejas de cemento mezcladas con PET (TilPet). Como puede observarse en la figura y en la tabla siguiente, el caso renovado presenta una carga anual menor. Aunque la reducción obtenida no es muy alta (2,62%), el hecho de que se reduzca el consumo de energía, junto con la retirada de PET del entorno, contribuye a una mejora en las emisiones de gases de efecto invernadero y en la contaminación ambiental por plásticos.

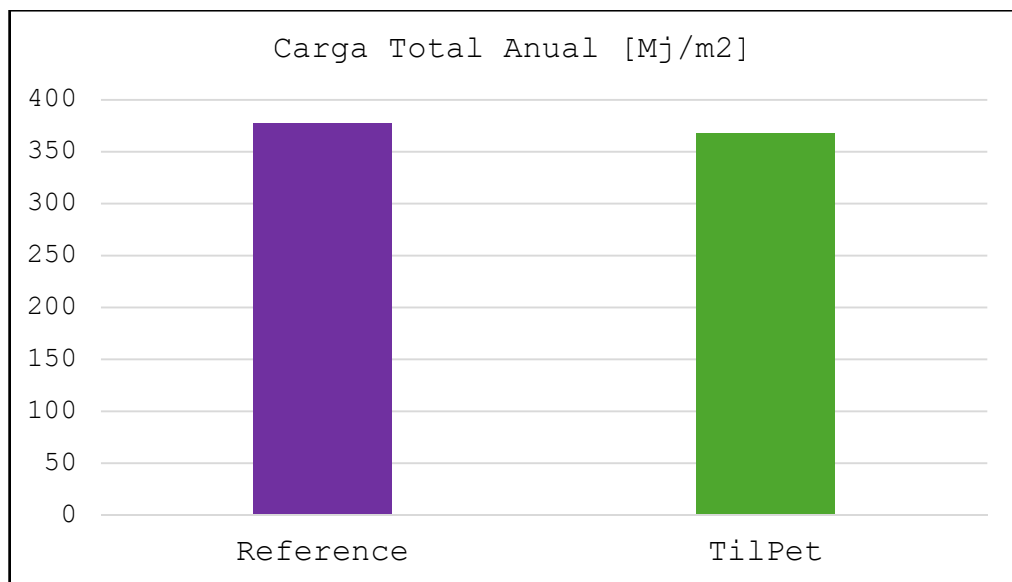


Figura 3. Cargas totales anuales para los casos de referencia y rehabilitado.

	Caso de Referencia	Caso rehabilitado
Cargas totales anuales [Mj/m²]	377.74	367.76

Tabla 5. Cargas totales anuales para los casos de referencia y rehabilitado.

Resultados Económicos

Se han considerado dos escenarios para el análisis económico:

- S1: La rehabilitación del caso de referencia se lleva a cabo por razones energéticas y ambientales, y no porque el caso de referencia necesite rehabilitación.
- S2: El caso de referencia necesita ser rehabilitado. Entonces, se consideran dos opciones: mantener el sistema inicial o rehabilitar la cubierta con tejas de cemento que incorporan PET.

Para el análisis, se ha asumido que la vivienda se acondiciona mediante una bomba de calor con una eficiencia media de SEER = 4,5 y SCOP = 3,5.

En el caso S2, el precio estimado de fabricación e instalación según el Generador de Precios de la Construcción de CYPE Ingenieros para tejas cerámicas es de 38 €/m².

Como se describió anteriormente, los resultados económicos del Análisis de Coste del Ciclo de Vida se han obtenido utilizando el método P1-P2 (Duffie y Beckman, 2006), para el período considerado de 40 años de vida útil de las tejas de Pet y de 10 años para la pintura fría.

La Tabla 6 muestra los resultados económicos obtenidos en el análisis de costes para el ciclo de vida. Todos los valores se dan en €/m².

Escenario	Costes Energéticos		Fabricación e instalación		Costes Totales	
	Reference	Rehabilitado	Referencia	Rehabilitado	Referencia	Rehabilitado
S1	360.3	353.65	0	43	360.3	396.65
S2	360.3	353.65	38	43	398.3	396.65

Tabla 6. Resultados económicos obtenidos en el análisis de costes para el ciclo de vida.

Como puede verse en esta tabla, para el escenario S1 los costes totales para toda la vida útil son de 360,3 €/m² para el caso de referencia y 396,65 €/m² para el caso rehabilitado. Por lo tanto, en este caso, no existe un ahorro económico real en los costos totales a lo largo de todo el ciclo de vida. Esto se debe a que los ahorros en los costos de consumo de energía logrados por la medida de rehabilitación propuesta no son suficientes para compensar el costo de la medida si se lleva a cabo únicamente con el propósito de mejorar el desempeño energético y ambiental, sin que la renovación sea necesaria debido al estado de la cubierta del edificio original.

En cuanto al escenario S2, es decir, asumiendo que la cubierta necesita ser renovada y que los costos de instalación son inevitables, los costos totales para toda la vida útil son de 398,3 €/m² para el caso de referencia y 396,65 €/m² para el caso reacondicionado. Por lo tanto, existe un ligero ahorro de 1,65 €/m². Este ahorro no parece lo suficientemente significativo como para justificar la rehabilitación propuesta; en términos puramente económicos, la rehabilitación propuesta produce un ahorro muy pequeño. Sin embargo, considerando que este ahorro está vinculado a una reducción en el consumo de energía y a la retirada de una cantidad significativa de PET del entorno, puede considerarse que la renovación propuesta ofrece ventajas suficientes para resultar interesante desde un punto de vista ambiental, ya que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y la liberación de sustancias perjudiciales para el medio ambiente, sin generar costos adicionales.

Conclusiones

El análisis energético llevado a cabo permitió constatar un aumento en las cargas de calefacción y una disminución en las cargas de refrigeración para el caso rehabilitado frente al caso inicial de referencia, mientras que la carga anual total muestra un ligero descenso del 2,62% en el caso rehabilitado respecto al de referencia.

En cuanto al análisis de costes para el ciclo de vida efectuado, éste permitió evaluar la viabilidad económica de la rehabilitación propuesta.

Como resultado de este análisis de costes, se concluyó que la rehabilitación de la cubierta de la vivienda social considerada, utilizando la solución propuesta, solo es rentable en términos puramente económicos si las cubiertas necesitan ser rehabilitadas, y la cuestión es qué tipo de rehabilitación se lleva a cabo. En este caso, la rehabilitación con tejas de cemento que incorporan PET resulta en un ahorro neto de 1,65 €/m² para todo el ciclo de vida.

Por lo tanto, se puede decir que este tipo de renovación, en comparación con el uso de otros materiales más convencionales, genera pequeños ahorros económicos que la hacen viable económicamente. Sin embargo, los puntos más fuertes a favor del uso de este material para la rehabilitación de viviendas sociales son:

- Disminución del consumo de energía y, por lo tanto, reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Uso de un material con pocas perspectivas de reutilización y, por lo tanto, reducción de los residuos asociados y del correspondiente impacto ambiental.

En consecuencia, las tejas de cemento con incorporación de PET constituyen una estrategia viable, tanto desde el punto de vista energético como económico, para fomentar la sostenibilidad urbana. Mejoran las condiciones de vida de los habitantes, reducen la liberación de residuos plásticos como el PET, y disminuyen el consumo energético destinado al confort térmico interior durante todo el año, contribuyendo así a la reducción de gases de efecto invernadero y al cumplimiento de los objetivos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

Referencias

Das P, Rudra S, Maurya K, et al (2023). Ultra-emissive mgo-pvdf polymer nanocomposite paint for passive daytime radiative cooling. *Advanced Material Technologies* 8:1–8. <https://doi.org/10.1002/admt.202301174>

Domínguez-Torres, C.-A., Domínguez-Torres, H., & Domínguez-Delgado, A. (2021). Optimization of a Combination of Thermal Insulation and Cool Roof for the Refurbishment of Social Housing in Southern Spain. *Sustainability*, 13(19), 10738. <https://doi.org/10.3390/su131910738>

Callejas, I.J.A.; da Guarda, E. L. A.; Durante, L.C.; Krüger, E. (2025). Cement roof tiles manufactured with PET waste: Experimental tests and thermal building simulations, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 495, 145063, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145063>.

CTE (2019). *Código Técnico de la Edificación*. Madrid: Ministerio de Fomento

Díaz, P.F. *Centrales Térmicas*. Biblioteca Sobre Ingeniería Energética. Universidad de Cantabria. Available

online: <https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=15>

Duffie, J.A.; Beckman, W. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*; John Wiley and Sons Inc.: Hoboken, NJ, USA.

Omosebi Taiwo, O., & Abas, N. F. (2021). Mechanical properties and durability of PET waste aggregates in roof tiles production. *Int. J. Recent Technol. Eng*, 9, 300-304.

Saafi, K.; Daouas, N. (2018). A life cycle cost analysis for an optimum combination of cool coating and thermal insulation of residential building roofs in Tunisia. *Energy*, 152, 925–938. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.010>

ZeroWasteEurope (2022). How circular is PET?. <https://zerowasteurope.eu/library/how-circular-is-pet/>

Materiales de segunda vida: reutilización de residuos industriales en arquitectura

Second-life materials: reuse of industrial waste in architecture

ANTONIO PÍO BAUZÁ LAORDEN/ Universidad CEU San Pablo

Palabras clave Keywords

Materiales reciclados, economía circular, sostenibilidad, residuos industriales, arquitectura regenerativa

Recycled materials, circular economy, sustainability, industrial waste, regenerative architecture.

Resumen

La arquitectura contemporánea enfrenta un desafío crucial: transformar la forma en que producimos, construimos y consumimos los materiales que conforman nuestro entorno. En un contexto de crisis ambiental y escasez de recursos, la economía circular se presenta como un modelo alternativo que busca mantener los recursos en uso durante el mayor tiempo posible, reduciendo los residuos y minimizando las emisiones de carbono. Este capítulo aborda el papel de los materiales de segunda vida en la construcción, entendidos como aquellos procedentes de residuos industriales o subproductos de sectores ajenos a la arquitectura. A través del análisis de casos reales, se muestran estrategias de reutilización que demuestran la viabilidad técnica y cultural de estos materiales en el ámbito constructivo. La investigación destaca cómo la integración de residuos plásticos, textiles, agrícolas, minerales y alimentarios puede contribuir no solo a reducir el impacto ambiental, sino también a generar nuevas narrativas materiales y sociales en la arquitectura. Finalmente, se reflexiona sobre los retos técnicos, normativos y culturales que aún deben superarse para consolidar una construcción verdaderamente circular.

Abstract

Contemporary architecture faces a crucial challenge: transforming how we produce, build, and consume the materials that shape our environment. In a context of environmental crisis and resource scarcity, the circular economy emerges as an alternative model that seeks to keep resources in use for as long as possible, reducing waste and minimizing carbon emissions. This chapter addresses the role of second-life materials in construction, understood as those derived from industrial waste or byproducts from sectors outside of architecture. Through the analysis of real-world cases, reuse strategies are presented that demonstrate the technical and cultural viability of these materials in the construction field. The research highlights how the integration of plastic, textile, agricultural, mineral, and food waste can contribute not only to reducing environmental impact but also to generating new material and social narratives in architecture. Finally, the chapter reflects on the technical, regulatory, and cultural challenges that still need to be overcome to consolidate truly circular construction.

Introducción

El sector de la construcción se encuentra actualmente en el centro del debate sobre sostenibilidad y cambio climático. De acuerdo con el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), los edificios y la construcción representan alrededor del 36 % del consumo energético mundial y cerca del 40 % de las emisiones globales de dióxido de carbono. Estas cifras sitúan al ámbito de la arquitectura y la ingeniería como uno de los principales responsables del calentamiento global, tanto por la energía utilizada durante la vida útil de los edificios como por el carbono incorporado en los materiales empleados para construirlos. Esta realidad ha impulsado la búsqueda de nuevos modelos de producción y diseño, en los que la reutilización, el reciclaje y la innovación material desempeñen un papel clave. En este contexto, la idea de dar una 'segunda vida' a los materiales, especialmente a aquellos que provienen de sectores industriales ajenos a la construcción, se convierte en una oportunidad para repensar las relaciones entre materia, diseño y sostenibilidad.

La urgencia de la circularidad en la construcción

El modelo constructivo actual se basa en un sistema lineal de extracción, uso y eliminación que resulta insostenible en el contexto actual de crisis ecológica. Cada año, la industria de la construcción consume más de la mitad de los recursos naturales extraídos en el planeta y genera un tercio de los residuos sólidos urbanos. Además, materiales como el cemento, el acero o el vidrio concentran una gran parte de las emisiones industriales debido a sus procesos de producción intensivos en energía. Frente a este panorama, la economía circular ofrece un marco alternativo que propone mantener los materiales y productos en uso el mayor tiempo posible, restaurando y regenerando los sistemas naturales. En arquitectura, esto implica un cambio profundo de mentalidad: diseñar no solo para construir, sino también para desmontar, recuperar y revalorizar.

Residuos como recurso: hacia una nueva ecología material

La noción de materiales de segunda vida no se limita al reciclaje convencional. Supone un enfoque más amplio en el que los residuos se consideran recursos potenciales capaces de ser transformados en materiales de construcción. Esta nueva ecología material requiere colaboración entre sectores industriales, investigación tecnológica y una revisión cultural del concepto de valor. Incorporar residuos de industrias como la textil, la alimentaria o la agrícola en el diseño arquitectónico no solo reduce el impacto ambiental, sino que amplía el repertorio estético y simbólico de los proyectos. En este sentido, la arquitectura se convierte en un espacio de experimentación donde la innovación material se une a la responsabilidad ecológica.

Casos de estudio y estrategias por origen material

Plásticos y textiles reciclados

Los plásticos y textiles son dos de los residuos más abundantes del planeta y también de los más persistentes. En los últimos años, diversas iniciativas han explorado su reutilización en arquitectura. Proyectos como 'Precious Plastic' han desarrollado tecnologías accesibles para transformar residuos plásticos, como el PET o el HDPE, en paneles, mobiliario y cerramientos. Estos materiales presentan ventajas como su ligereza, resistencia al agua y capacidad de personalización. Sin embargo, su adopción masiva enfrenta retos como el comportamiento frente al fuego y la aceptación social.



Figura 1. Pared formada por bloques de residuos plásticos. Precious Plastic.

En el ámbito textil, productos como el aislante ‘Métisse’, fabricado a partir de vaqueros reciclados, demuestran que los residuos posconsumo pueden alcanzar prestaciones térmicas y acústicas de alta calidad. Este tipo de materiales, además de funcionales, aportan un relato de circularidad tangible: las fibras que antes vestían cuerpos humanos ahora envuelven los espacios que habitamos.



Figura 2. Panel aislante formado por fibras de pantalones vaqueros. Métisse.

Materiales agrícolas y minerales

Los residuos agrícolas y minerales ofrecen un enorme potencial para el desarrollo de materiales de construcción de baja huella ambiental. Un ejemplo notable es el biocompuesto ‘Agrocrete’, elaborado con residuos como la cáscara de arroz o la paja, que permite fabricar bloques ligeros con buenas propiedades térmicas. Estos materiales no solo reutilizan desechos, sino que también promueven economías locales. En paralelo, la reutilización de escorias siderúrgicas y cenizas volantes en la fabricación de cementos y geopolímeros permite reducir la dependencia del clinker, uno de los principales emisores de CO₂ en la industria. El uso de estos residuos industriales como componentes activos en la mezcla de morteros o hormigones demuestra que la circularidad también puede integrarse en procesos constructivos a gran escala.



Figura 3. Construcción de muro perimetral con bloques Agrocete. GreenJams.

Materiales experimentales y emergentes

Más allá de los materiales consolidados y de los sistemas de reciclaje ya normalizados, en los últimos años ha surgido una nueva generación de materiales experimentales que amplían el horizonte de lo posible en la construcción circular. Estos desarrollos no solo buscan reducir el impacto ambiental, sino también replantear la dimensión simbólica y sensorial de la materia, explorando cómo los desechos pueden transformarse en elementos con valor estético, técnico y narrativo.

Uno de los ejemplos más sugerentes son los tableros fabricados con vidrio reciclado. A través de técnicas de fusión y prensado, fragmentos de vidrio posconsumo —procedentes de botellas, ventanas o pantallas— se compactan hasta formar superficies sólidas con una textura similar a la piedra natural. Este proceso, conocido como *glass terrazzo*, da lugar a materiales como los producidos por la empresa británica Smile Plastics, que fabrica paneles decorativos a partir de vidrio y plásticos reciclados, empleados en interiores y mobiliario arquitectónico. Estos tableros no solo evitan el vertido de toneladas de vidrio, sino que generan una estética única, con vetas y transparencias que revelan su procedencia. En arquitectura interior se han utilizado en locales, revestimientos y mobiliario, demostrando que la belleza puede surgir literalmente de lo que la sociedad desecha.



Figura 4. Banco fabricado a partir de vidrio reciclado. Smile Plastics.

Otro campo en expansión es el de los aislantes naturales derivados de algas marinas. Las algas poseen excelentes propiedades térmicas y acústicas, además de ser un recurso renovable que crece rápidamente sin requerir tierra cultivable ni agua dulce. Un ejemplo emblemático es el Seaweed House (Dinamarca, 2013), proyectado por el estudio en la isla de Læsø. En este edificio, las algas *Zostera*

marina, recolectadas de las costas danesas, se emplearon como material aislante en muros y cubiertas, siguiendo una tradición vernácula reinterpretada con técnicas contemporáneas. Los resultados demostraron una durabilidad superior a la esperada, una excelente capacidad de aislamiento y una huella de carbono negativa, al fijar más CO₂ del que se emite durante su ciclo de vida. Este caso evidencia cómo un material local y subestimado puede incorporarse de nuevo a la arquitectura con un sentido ecológico y cultural.



Figura 5. Seaweed House. Vandkunsten Architects.

El micelio fúngico, por su parte, ha captado la atención de investigadores y diseñadores por su capacidad para crecer literalmente dentro de moldes hasta formar estructuras sólidas. Este material, obtenido del entramado de raíces de los hongos, se cultiva a partir de residuos agrícolas como el serrín o la paja. Tras un proceso de secado, el resultado es un biocompuesto ligero, ignífugo y completamente biodegradable. Una de las experiencias más conocidas es el Hy-Fi Pavilion (2014), diseñado por The Living y patrocinado por MoMA PS1 en Nueva York. El pabellón se construyó con más de 10.000 bloques de micelio, demostrando que la arquitectura puede literalmente “cultivarse” en lugar de fabricarse. Aunque su durabilidad es limitada, su valor experimental ha impulsado múltiples investigaciones sobre cómo escalar esta técnica hacia aplicaciones más permanentes, especialmente en elementos modulares y aislantes.



Figura 6. Hy-Fi Pavilion. The Living.

En el ámbito de los biocompuestos alimentarios, la experimentación también ha dado resultados notables. El bagazo de cerveza, un residuo orgánico generado en grandes cantidades por la industria cervecera, se ha utilizado para crear paneles y tableros prensados, como los desarrollados por el estudio Re-Mat en España. Estos materiales, combinando fibras del bagazo con resinas naturales, ofrecen rigidez y una textura cálida similar a la madera. Por su parte, la empresa Shellworks en el Reino Unido ha desarrollado bioplásticos a base de conchas marinas —ricas en carbonato cálcico—, generando materiales moldeables y compostables empleados en revestimientos y objetos de interior. También los posos de café se han transformado en materia prima: proyectos como Kaffeeform (Alemania) producen

tazas, objetos y piezas rígidas moldeadas con este residuo, demostrando la versatilidad del desecho orgánico en la economía circular.

Lo que une a todas estas propuestas es una visión transversal de la innovación. Ya no se trata de inventar materiales exóticos con altas prestaciones tecnológicas, sino de **reconocer el potencial oculto** en los flujos de residuos cotidianos. Estas soluciones no solo reducen la cantidad de desechos que terminan en vertederos, sino que también revalorizan la materia desde un punto de vista cultural. Incorporar residuos alimentarios o naturales en el lenguaje arquitectónico implica aceptar que la belleza puede ser imperfecta, que las huellas del origen no deben borrarse, sino integrarse como parte del relato constructivo.

En última instancia, este tipo de materiales experimentales propone una **nueva sensibilidad ecológica y poética**: una arquitectura que no oculta el paso del tiempo ni el rastro del proceso, sino que los celebra. Lo que antes era considerado desecho se convierte así en símbolo de regeneración, en testimonio tangible de una manera distinta de construir y habitar el mundo.

Retos técnicos, normativos y culturales

A pesar de su potencial, los materiales de segunda vida enfrentan diversos obstáculos que limitan su adopción. Desde el punto de vista técnico, la heterogeneidad de los residuos dificulta la estandarización y el control de calidad. En el ámbito normativo, las regulaciones actuales no siempre contemplan materiales alternativos, lo que restringe su uso en proyectos certificados. Por otro lado, existen barreras culturales: aún persiste la idea de que lo reciclado es sinónimo de baja calidad. Superar estas percepciones requiere de divulgación, formación profesional y ejemplos demostrativos que prueben su eficacia. Finalmente, los retos logísticos y económicos también son relevantes, ya que la recolección, procesamiento y distribución de estos materiales demandan infraestructuras especializadas y modelos de negocio circulares. El futuro de la construcción circular dependerá de la capacidad del sector para articular estas soluciones en marcos económicos y regulatorios viables.

Reflexiones finales: hacia una arquitectura regenerativa

Los materiales de segunda vida representan mucho más que una alternativa técnica para reducir el impacto ambiental de la construcción: constituyen una oportunidad para redefinir la relación entre la arquitectura y los ciclos de la materia. Su incorporación en el proyecto arquitectónico impulsa una práctica más consciente, en la que los residuos se reconocen como recursos con valor y trayectoria, y donde el edificio deja de entenderse como un objeto acabado para concebirse como un proceso continuo de transformación. Este enfoque no solo promueve la sostenibilidad, sino también una ética del cuidado y la regeneración, al proponer sistemas constructivos capaces de adaptarse, modificarse y nutrirse de lo que otros sectores desechan. Avanzar hacia una arquitectura regenerativa implica asumir que cada decisión material tiene una dimensión ecológica y cultural, y que la innovación no depende de crear más, sino de aprender a mirar los materiales existentes desde otra perspectiva, con la convicción de que el futuro de la construcción será circular o, sencillamente, no será.

Desde esta perspectiva, los materiales de segunda vida no deben interpretarse únicamente como alternativas de bajo impacto o soluciones técnicas para reducir residuos. Su utilización en edificios también refleja una transformación en los criterios de diseño y en la responsabilidad profesional. Cada componente construido a partir de residuos —ya sean bloques fabricados con subproductos agrícolas o paneles elaborados con polímeros reciclados— evidencia una decisión consciente encaminada a disminuir la extracción de recursos vírgenes y a extender la vida útil de los materiales ya existentes.

Adoptar este enfoque implica revisar los fundamentos de la práctica arquitectónica. Durante mucho tiempo, la innovación en construcción se ha asociado principalmente a nuevos materiales, sistemas constructivos o mejoras en el rendimiento. Sin embargo, en el actual contexto de emergencia climática, la evaluación de un material debe incorporar necesariamente su huella ambiental completa: emisiones, energía incorporada, impacto en residuos y capacidad de reutilización futura. En este sentido, la economía circular propone un tipo de innovación diferente, centrada no en ampliar la oferta material, sino en optimizar y revalorizar los recursos ya disponibles. Esta transición no solo es técnica, sino estratégica, y redefine la manera en que el sector entiende la sostenibilidad y la eficiencia material.

Este cambio de paradigma demanda una ética del cuidado. Significa asumir que toda decisión material tiene consecuencias ecológicas, sociales y culturales. Cada elección de un material reciclado, cada estrategia de reutilización o de desmontaje selectivo, es un acto de responsabilidad hacia el territorio y

hacia las generaciones futuras. La arquitectura deja así de ser una actividad extractiva para convertirse en una práctica regenerativa, capaz de reparar parte del daño que históricamente ha causado.

La metáfora de los edificios como sistemas vivos resulta especialmente útil para entender esta transición. Un sistema vivo se adapta, se transforma y se alimenta de los recursos disponibles sin agotarlos. Del mismo modo, una construcción circular no busca la permanencia estática, sino la capacidad de mutar y reintegrarse en los flujos materiales del entorno. En lugar de erigir monumentos cerrados sobre sí mismos, la arquitectura regenerativa propone estructuras abiertas al cambio, con materiales que puedan desmontarse, reconfigurarse y reincorporarse al ciclo productivo.

Por supuesto, este camino no está exento de contradicciones. No todos los materiales reciclados son neutros en términos de energía o emisiones, ni todas las soluciones son universalmente aplicables. Pero precisamente ahí reside la madurez de la práctica arquitectónica contemporánea: en reconocer la complejidad y actuar desde una conciencia crítica, combinando rigor técnico con sensibilidad ambiental.

En última instancia, avanzar hacia una arquitectura regenerativa implica una transformación de la mirada. La innovación ya no se mide por la capacidad de producir lo nunca visto, sino por la habilidad de redescubrir lo que ya tenemos. Significa reaprender a observar el entorno productivo, a detectar oportunidades donde antes solo veíamos desperdicio, y a construir puentes entre sectores que hasta ahora funcionaban de manera aislada.

Podemos decir, entonces, que el futuro de la arquitectura dependerá de su capacidad para convertirse en una disciplina circular, donde el residuo se perciba como materia en tránsito y donde cada decisión constructiva sea una oportunidad para regenerar, no para agotar. En ese horizonte, la frase adquiere un nuevo sentido: el futuro de la construcción será circular, o, simplemente, no será.

A pesar de su potencial, los materiales de segunda vida enfrentan diversos obstáculos que limitan su adopción. Desde el punto de vista técnico, la heterogeneidad de los residuos dificulta la estandarización y el control de calidad. En el ámbito normativo, las regulaciones actuales no siempre contemplan materiales alternativos, lo que restringe su uso en proyectos certificados. Por otro lado, existen barreras culturales: aún persiste la idea de que lo reciclado es sinónimo de baja calidad. Superar estas percepciones requiere de divulgación, formación profesional y ejemplos demostrativos que prueben su eficacia. Finalmente, los retos logísticos y económicos también son relevantes, ya que la recolección, procesamiento y distribución de estos materiales demandan infraestructuras especializadas y modelos de negocio circulares. El futuro de la construcción circular dependerá de la capacidad del sector para articular estas soluciones en marcos económicos y regulatorios viables.

Referencias

Agrocrete. (2024). *Sustainable building materials from agricultural waste* [en línea]. [Consulta: 21 de agosto de 2025]. Recuperado de: https://solarimpulse.com/solutions-explorer/agrocrete?utm_source=chatgpt.com

Métisse. (2023). *Isolation thermique et acoustique à base de textile recyclé* [en línea]. [Consulta: 12 de septiembre de 2025]. Recuperado de: https://www.lerelais.org/ressources/document/1424855193_20150224BaissePrixMetisse.pdf?utm_source=chatgpt.com

Precious Plastic. (2023). *Open Source plastic recycling community* [en línea]. [Consulta: 21 de agosto de 2025]. Recuperado de: <https://www.preciousplastic.com>

Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2023). *Global status report for buildings and construction* [en línea]. [Consulta: 6 de septiembre de 2025]. Recuperado de: https://globalabc.org/sites/default/files/2024-11/global_status_report_buildings_construction_2023.pdf?utm_source=chatgpt.com

World Green Building Council. (2022). *Bringing embodied carbon upfront: Coordinated action for the building and construction sector* [en línea]. [Consulta: 3 de septiembre de 2025]. Recuperado de: https://worldgbc.s3.eu-west-2.amazonaws.com/wp-content/uploads/2022/09/22123951/WorldGBC_Bringing_Embodied_Carbon_Upfront.pdf

Cerámica Circular: Fabricación Aditiva con Residuos Vegetales y Minerales.

Circular Ceramics: Additive Manufacturing with Plant and Mineral Waste

CARMEN GALÁN MARÍN/ Universidad de Sevilla

ADRIANO JIMÉNEZ-GUERRERO/ Universidad de Sevilla

MAR BARBERO BARRERA/ Universidad Politécnica de Madrid

SOFÍA MELERO TUR/ Universidad CEU San Pablo

JOSÉ PÉREZ FENOY/ Centro Tecnológico de la Cerámica, F. Innovarcilla

CARLOS ALBERTO RIVERA-GÓMEZ/ Universidad de Sevilla

Palabras clave Keywords

Fabricación aditiva, Cerámica, Economía Circular, Refrigeración Evaporativa, Residuos industriales, Pasivo.

Additive manufacturing, ceramics, circular economy, evaporative cooling, industrial waste.

Recycled materials, circular economy, sustainability, industrial waste, regenerative architecture.

Resumen

Este artículo presenta los resultados del proyecto de investigación CERECA 3D, centrado en el desarrollo de un sistema de acondicionamiento térmico pasivo mediante celosías cerámicas impresas en 3D. La investigación aborda la intersección entre la economía circular, la fabricación aditiva (LDM) y la arquitectura bioclimática. Se ha evaluado la incorporación de residuos vegetales (serrín) y minerales (lodos de mármol) en matrices de arcilla roja y greda para mejorar la porosidad y, por ende, la capacidad de enfriamiento evaporativo, sin comprometer la viabilidad estructural. Los resultados demuestran que la adición de serrín aumenta significativamente la porosidad (hasta un 52,92% en mezclas con greda), favoreciendo la evapotranspiración, mientras que los residuos de mármol ofrecen un equilibrio entre porosidad y resistencia mecánica. El sistema propuesto ofrece una solución industrializada y sostenible para la mejora de la resiliencia climática en entornos urbanos y edificios.

Abstract

This article presents the results of the CERECA 3D research project, focused on the development of a passive thermal conditioning system using 3D printed ceramic lattices. The research addresses the intersection between the circular economy, additive manufacturing (LDM) and bioclimatic architecture. The incorporation of plant residues (sawdust) and minerals (marble sludge) in red clay and clay matrices has been evaluated to improve porosity and, therefore, evaporative cooling capacity, without compromising structural feasibility. The results show that the addition of sawdust significantly increases porosity and mechanical resistance. The proposed system offers an industrialized and sustainable solution for improving climate resilience in urban environments and buildings.

Introducción

La necesidad de incrementar la resiliencia climática de las ciudades y edificios se ha convertido en una prioridad global. En regiones mediterráneas como Andalucía, y en general en climas cálidos, el aumento de las temperaturas exige soluciones que mitiguen el efecto de isla de calor y reduzcan la demanda energética de los sistemas de climatización convencionales (Sola-Caraballo, et al. 2025). En regiones mediterráneas, el confort térmico en espacios exteriores y semi-exteriores se ve comprometido por olas de calor y la isla de calor urbana (Zhang, et al. 2020).

El sector de la construcción se enfrenta al doble reto de reducir su huella de carbono mediante el uso de materiales de bajo impacto y de implementar estrategias pasivas que disminuyan el consumo energético operacional de los edificios (Pomponi & Moncaster, 2017).

En este contexto, los sistemas cerámicos evapotranspirativos ofrecen una solución pasiva al combinar sombreado y enfriamiento por evaporación (He., & Hoyano. 2010). La fabricación aditiva cerámica mediante LDM habilita geometrías complejas, personalización y tiradas cortas sin coste de moldes (Chan et al., 2020), facilitando piezas porosas optimizadas para intercambio aire-agua.

El proyecto CERECA 3D (Sistema de acondicionamiento térmico pasivo mediante celosía impresa en Cerámica Evapotranspirativa Arquitectónica) surge como respuesta a estos desafíos. Financiado por la Junta de Andalucía y con la colaboración de la Universidad de Sevilla, Fundación Innovarcilla, Universidad Politécnica de Madrid, Universidad San Pablo CEU e Instituto Eduardo Torroja CSIC, el proyecto propone una revisión tecnológica de la cerámica tradicional mediante procesos de industrialización avanzada.

Economía Circular y Valorización de Residuos

La transición hacia una economía circular en el sector de la construcción exige reimaginar materiales y procesos con bajo impacto ambiental y alta funcionalidad. La economía circular en la arquitectura implica reintroducir subproductos industriales en el ciclo de fabricación de nuevos materiales. La industria cerámica posee un alto potencial para absorber residuos inorgánicos y orgánicos en su matriz arcillosa (Montero, et al. 2009; Demir, I. 2008). La incorporación estratégica de estos materiales no sólo reduce el consumo de materias primas vírgenes, sino que permite "customizar" las propiedades del material final, tales como la porosidad, la densidad y la conductividad térmica (Melero-Tur, et al. 2025).

En esta investigación se explora el uso de residuos locales: el serrín, proveniente de la industria maderera y agrícola, y los lodos de mármol, remanente de la industria de la piedra natural. El objetivo es transformar un problema de gestión de residuos en una oportunidad para mejorar la funcionalidad higrotérmica de los componentes arquitectónicos.

Refrigeración Evaporativa en Arquitectura

La refrigeración evaporativa es una estrategia bioclimática tradicional ampliamente documentada en climas áridos y mediterráneos, que aprovecha el cambio de fase del agua (de líquido a vapor) para absorber calor del aire circundante, reduciendo su temperatura de bulbo seco. La eficiencia de este sistema depende intrínsecamente de la capacidad del material para retener agua y permitir su evaporación gradual. Estudios previos del equipo de investigación han demostrado que el acondicionamiento de espacios semi-exteriores puede reducir hasta un 11% el consumo energético de las zonas interiores colindantes (Diz-Mellado, et al. 2024).

La cerámica constituye un soporte idóneo para soluciones arquitectónicas de enfriamiento evaporativo debido a su alta capacidad de absorción y retención de agua (Ibrahim, et al., 2003; Jin et al., 2024). De esta manera, la superficie de la cerámica se mantiene por debajo de la temperatura del aire exterior, e incluso cercana a la temperatura de bulbo húmedo, lo que genera reducciones térmicas del aire que la atraviesa de varios grados y contribuye de forma pasiva al confort ambiental en espacios urbanos y arquitectónicos (He., & Hoyano. 2010).

Fabricación Aditiva (LDM)

La tecnología de Liquid Deposition Modeling (LDM) se basa en la extrusión controlada de pastas cerámicas en estado semilíquido a través de una boquilla que es controlada por una máquina de control numérico. La superposición de capas de dicho material permite la creación de geometrías tridimensionales complejas, ofreciendo una libertad formal imposible de alcanzar con la extrusión o el prensado tradicionales (Hu et al., 2021; Wang et al., 2024). Esta flexibilidad es clave para diseñar piezas con geometrías internas optimizadas para el flujo de aire (Pelanconi et al., 2019) y el auto-sombreado (Cruz et al., 2020). Además, la fabricación aditiva minimiza la generación de residuos durante el proceso

productivo (zero-waste manufacturing) y permite la personalización paramétrica de los componentes (Yin., et al. 2023).

Este proceso de fabricación permite además la utilización de un amplio espectro de pasas arcillosas, lo cual facilita el uso de materias primas de proximidad. Si bien dichas pastas deben ser tamizadas e hidratadas para garantizar unas condiciones óptimas de imprimibilidad (Diz-Mellado, et al. 2025).

Más allá de las ventajas productivas, la tecnología LDM se integra de forma natural en flujos de trabajo digitales basados en gemelos digitales, lo que amplía notablemente las posibilidades geométricas de las piezas cerámicas. La combinación de escaneado 3D, modelado paramétrico e impresión con arcillas extruibles permite reproducir y también reinterpretar geometrías complejas con alto nivel de detalle, como se ha demostrado recientemente en el campo de la restauración del patrimonio construido mediante la generación de réplicas cerámicas ornamentales a partir de nubes de puntos escaneadas (Diz-Mellado et al., 2024). Estos desarrollos evidencian que el LDM no sólo es capaz de reproducir fielmente perfiles curvilíneos, transiciones suaves y variaciones de espesor, sino también de generar estructuras repetitivas y gradientes geométricos que, en el contexto de este trabajo, resultan especialmente pertinentes para el diseño de celosías evapotranspirativas con canales internos y superficies activas optimizadas.

Objetivos de la Investigación

El objetivo principal es desarrollar sistemas cerámicos de celosía "fría" industrializada. Estos elementos, prefabricados mediante impresión 3D, funcionan mediante técnicas evapotranspirativas (enfriamiento latente) y control de radiación solar (enfriamiento sensible).

Los objetivos específicos incluyen:

- Optimización de pastas cerámicas: Analizar procedimientos para incrementar la porosidad mediante la inclusión de residuos, garantizando la estabilidad y la imprimibilidad.
- Desarrollo de modelos: Diseñar geometrías complejas que maximicen la superficie de contacto con el aire para potenciar la evaporación.
- Industrialización: Validar el uso de tecnologías de fabricación aditiva (LDM) para la producción estandarizada y escalable de estos elementos.

Metodología Experimental

Materiales Base

Se emplearon dos tipos de arcilla (greda y roja) cuya composición mineralógica se detalla en la tabla 1, con adiciones de serrín (1.5–63 µm; ignición 118–142 °C) y lodos de mármol (CaCO₃ <300 µm; calcinación ~910 °C). Ambas arcillas se procesaron tanto en su estado natural como molidas para asegurar una granulometría adecuada para la impresión 3D. Las arcillas se molieron mediante trituradora de mandíbulas y molino de martillos hasta un tamaño <300 µm para conseguir homogeneidad y se ajustó reología para impresión con boquillas 2–8 mm.

Arcilla	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	ZrO ₂
Greda	62,1	11,6	4,1	1,4	7,4	2,7	0,7	0,1	0,1
Roja	52,5	18,5	7,7	3,5	2,6	6,0	0,8	0,2	-

Tabla 1. Composición mineralógica de las arcillas utilizadas.

Para modificar la estructura de poros y las propiedades mecánicas, se utilizaron dos tipos de residuos, procesados mediante molturado por debajo de las 300 micras para evitar obstrucciones en la boquilla de impresión como se observa en la figura 1:

- Serrín (S): Residuo orgánico que actúa como agente formador de poros. Durante la cocción, la materia orgánica se calcina, dejando huecos que aumentan la porosidad abierta.
- Lodo de Mármol (M): Residuo inorgánico (carbonato cálcico) que puede mejorar las propiedades mecánicas y reducir la contracción, aunque su efecto en la porosidad es diferente al de los orgánicos.



Figura 1. Preparación de las mezclas: izquierda Arcilla greda y mármol, derecha Arcilla roja y serrín. Imágenes de los autores.

Se establecieron diversas dosificaciones para evaluar el límite de incorporación de residuos sin perder la capacidad de impresión. Las mezclas se identifican por el tipo de arcilla (G/R), el tipo de residuo (S/M) y el porcentaje en peso añadido, detalladas en la tabla 2.

Tipo de arcilla	Residuo	Contenido de residuos (% peso)	Contenido de residuos (% volumen)	Arcilla ID
Arcilla Greda (G)	-	-	-	G
	Serrín (S)	4,7	15,0	G-S-15
		6,2	20,0	G-S-20
		7,7	25,0	G-S-25
	Mármol (M)	5,0	9,1	G-M-5
		10,0	16,7	G-M-10
		15,0	23,2	G-M-15
	-	-	-	R
	Arcilla Roja (R)	4,7	15,0	R-S-15
		6,2	20,0	R-S-20
		7,7	25,0	R-S-25
		5,0	9,9	R-M-5
		10,0	18,1	R-M-10
		15,0	24,8	R-M-15

Tabla 2. Detalle de las dosificaciones preparadas.

Proceso de Fabricación Aditiva

La impresión de los prototipos y probetas se realizó utilizando dos equipos con sistemas LDM:

- Brazo Robótico: ABB IRB4600 con un sistema de alimentación continua y extrusor WASP XL 3.0, permitiendo impresiones de gran escala (track lineal de 8m).
- Impresora Delta: Delta WASP 40100 Clay para pruebas de caracterización más pequeñas.

Se realizaron ensayos con los siguientes parámetros de impresión:

- Boquillas: 2 mm y 4 mm.
- Altura de capa: 1.8 mm (para boquilla de 2mm) y 2.7-3 mm (para boquilla de 4mm).
- Humedad de la pasta: Optimizada entre 25-35% para asegurar la reología adecuada.

Posteriormente se realizaron ensayos de densidades, porosidad, absorción y resistencias.

Resultados y Discusión

Imprimibilidad

El análisis de imprimibilidad determinó que el tamaño de partícula es el factor crítico. Las partículas finas (<300 micras) son esenciales para una mezcla homogénea. Se observó que la arcilla amarilla (Greda) presentaba una mejor trabajabilidad en rangos de humedad del 30-35%, mientras que la adición de serrín requería ajustes en la cantidad de agua debido a su capacidad de absorción hidrófila.

Propiedades Físicas: Porosidad y Densidad

Los ensayos físicos revelan una correlación directa entre el tipo/cantidad de residuo y la estructura porosa resultante (Ver Tabla 3).

Tipo de arcilla	Residuo	Pasta ID	Densidad aparente (kg/m3)	Densidad real (kg/m3)	Porosidad (%)
Arcilla Greda (G)	-	G	1,64	2,86	43,82
	Serrín (S)	G-S-15	1,38	2,75	50,12
		G-S-20	1,34	2,74	51,83
		G-S-25	1,30	2,70	52,92
	Mármol (M)	G-M-5	1,49	2,88	45,57
		G-M-10	1,47	2,85	46,89
		G-M-15	1,43	2,81	47,69
Arcilla Roja (R)	-	R	1,84	2,69	30,86
	Serrín (S)	R-S-15	1,66	2,45	35,21
		R-S-20	1,51	2,59	40,43
		R-S-25	1,43	2,58	44,65
	Mármol (M)	R-M-5	1,67	2,75	33,11
		R-M-10	1,64	2,72	34,70
		R-M-15	1,58	2,74	38,47

Tabla 3. Resumen de Propiedades Físicas Seleccionadas.

Efecto del Serrín: La incorporación de serrín provocó el mayor aumento de porosidad. En la arcilla Greda, se alcanzó un máximo de 52,92% con un 25% de serrín (G-S-25), lo que representa una mejora sustancial respecto al 43,82% de la muestra control. Esto es ideal para la función evaporativa, ya que aumenta la capacidad de absorción de agua.

Efecto del Mármol: El mármol también incrementó la porosidad, aunque en menor medida (hasta un 47,69% en G-M-15). Sin embargo, su impacto en la densidad fue menor que el del serrín.

Densidad: Todas las adiciones de residuos redujeron la densidad del material final, contribuyendo a piezas más ligeras, lo cual es ventajoso para el diseño de fachadas y celosías autoportantes.

Propiedades Mecánicas

El aumento de porosidad conlleva generalmente una disminución de la resistencia mecánica. El desafío del proyecto fue encontrar el equilibrio óptimo (Ver Tabla 4).

Las muestras con alto contenido de serrín (25%) sufrieron una caída de un 90% en la resistencia a compresión (de 29,65 MPa a 3,20 MPa en la Greda), sin embargo, la caída de resistencia a compresión de las probetas con un contenido de serrín del 20% es del 70% (de 29,65 MPa a 8.80 MPa). Aunque baja, esta resistencia puede ser suficiente para elementos de celosía no estructurales o autoportantes de baja altura, más aún teniendo en cuenta la reducción de peso que supone la inclusión del residuo.

Las muestras con polvo de mármol mantuvieron mejor las propiedades mecánicas. Por ejemplo, la G-M-5 conservó una resistencia a flexión de 9,93 MPa, muy cercana a los 12,05 MPa del patrón.

Arcilla Roja vs. Greda: La arcilla roja mostró consistentemente valores mecánicos superiores, alcanzando más de 44 MPa en compresión en estado puro, lo que sugiere que podría ser la base preferida para elementos que requieran mayor responsabilidad estructural, incluso tras la adición de residuos.

Tipo de arcilla	Residuo	Arcilla ID	Resistencia flexión (Mpa)	Resistencia compresión (Mpa)
Arcilla Greda (G)	-	G	12,05	29,65
	Serrín (S)	G-S-15	7,08	8,86
		G-S-20	3,52	8,80
		G-S-25	3,05	3,20
	Mármol (M)	G-M-5	9,93	5,68
		G-M-10	9,78	8,43
		G-M-15	9,84	6,70
Arcilla roja (R)	-	R	19,97	44,07
	Serrín (S)	R-S-15	8,33	8,76
		R-S-20	8,41	11,27
		R-S-25	6,70	6,90
	Mármol (M)	R-M-5	17,41	10,75
		R-M-10	17,06	21,25
		R-M-15	12,42	24,86

Tabla 4. Resumen de Propiedades Mecánicas

Conclusiones

La investigación desarrollada, bajo el proyecto CERECA 3D, confirma la viabilidad técnica de fabricar componentes cerámicos arquitectónicos utilizando impresión 3D y residuos industriales, alineándose con los principios de la economía circular.

La incorporación de serrín al 25% en peso, resulta ser la estrategia más efectiva para aumentar la porosidad (superando el 50%), propiedad que es clave para la refrigeración evaporativa. El aumento de porosidad obtenido se traduce en una mayor capacidad de retención y liberación de agua, lo que constituye el fundamento del rendimiento evaporativo del sistema. Aunque esto compromete la resistencia mecánica, los valores obtenidos son viables para aplicaciones de envolvente no estructural. Estos resultados se inscriben en la línea de otras investigaciones sobre la incorporación de residuos lignocelulósicos en materiales cerámicos para la construcción. Cultrone et al. describen que el aumento del contenido de serrín en ladrillos cocidos reduce la densidad aparente y la conductividad térmica, a costa de una disminución de la resistencia mecánica (Cultrone et al., 2020), similar al identificado en las mezclas con mayores contenidos de serrín de este estudio. De forma complementaria, trabajos sobre ladrillos permeables y aligerados con serrín en fracciones moderadas mejoran el comportamiento térmico e hídrico manteniendo resistencias suficientes para cerramientos no portantes (Muñoz et al., 2019).

Para aplicaciones que demanden mayor integridad estructural, la arcilla roja con adiciones moderadas de mármol o serrín (15%) ofrece una mayor versatilidad, con un compromiso óptimo entre resistencia y funcionalidad térmica. La respuesta combinada de porosidad moderada y buena capacidad resistente de las mezclas con lodo de mármol es coherente con estudios de ladrillos aligerados mediante la sustitución parcial de arcilla por residuos de mármol que resultan tener una mayor porosidad y absorción de agua junto con densidades y resistencias todavía compatibles con aplicaciones en envoltorios de baja responsabilidad estructural (Khan et al., 2021; Munir et al., 2018).

La fabricación aditiva con tecnología LDM se consolida como una herramienta capaz de procesar estas pastas "eco-modificadas", permitiendo la creación de geometrías complejas que no serían posibles mediante extrusión convencional. Desde el punto de vista funcional, la combinación de matrices cerámicas porosas y geometrías complejas obtenidas mediante LDM se alinea con desarrollos recientes de componentes cerámicos impresos en 3D orientados al amortiguamiento higrorotérmico y al enfriamiento evaporativo de la envolvente. Los resultados posicionan la cerámica circular impresa en 3D como una tecnología emergente con potencial real para la producción de celosías evaporativas de nueva generación, siendo factible ampliar futuras líneas de investigación que incluirán estudios de ACV, normativa y escalado industrial.

De este modo, el sistema no sólo reduce los residuos industriales y agrícolas, sino que propone un modelo pasivo de climatización dentro del marco internacional de soluciones para la adaptación climática de los edificios que puede reducir la dependencia energética de los edificios, contribuyendo a la mitigación del cambio climático en entornos urbanos del sur de Europa.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Junta de Andalucía, Consejería de Universidad, Investigación e Innovación, a través del Proyecto PAIDI 2021 Ref: PROYEXCEL_00532. Se agradece la colaboración y el soporte técnico de los laboratorios de Innovarcilla y del CITIUS de la Universidad de Sevilla.

Referencias

- Sola-Caraballo, J., et al. (2025). Multi-Criteria Assessment of Urban Thermal Hotspots: A GIS-Based Remote Sensing Approach in a Mediterranean Climate City. *Remote Sensing*, 17(2), pp. 231. DOI: <https://doi.org/10.3390/RS17020231>
- Zhang, R., et al. (2020). Increased European heat waves in recent decades in response to shrinking Arctic sea ice and Eurasian snow cover. *Climate and Atmospheric Science*, 3, pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41612-020-0110-8>
- Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production*, 143, pp. 710–718. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055>
- Chan, S. S. L., et al. (2020). 3D printing of clay for decorative architectural applications: Effect of solids volume fraction on rheology and printability. *Additive Manufacturing*, 35, 101335. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101335>
- Demir, I. (2008). Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks. *Waste Management*, 28(3), pp. 622–627. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.019>
- He, J., & Hoyano, A. (2010). Experimental study of cooling effects of a passive evaporative cooling wall constructed of porous ceramics with high water soaking-up ability. *Building and Environment*, 45(2), pp.461-472. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.07.002>
- Montero, M.A., et al (2009). The use of sewage sludge and marble residues in the manufacture of ceramic tile bodies. *Applied Clay Science, Volume 46*, pp. 404-408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.10.013>
- Melero-Tur, S., et al. (2025). Re-imagining the production of 3D printed ceramics through the incorporation of waste materials. *Construction, Energy, Environment and Sustainability*. Singapore: Springer Nature. DOI: 10.1007/978-981-95-1822-7_43
- Diz-Mellado, E., et al. (2024). Optimizing a courtyard microclimate with adaptable shading and evaporative cooling. *Journal of Building Engineering*, 88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109167>
- Ibrahim, E., et al. (2003). Performance of porous ceramic evaporators for building cooling application. *Energy and Buildings*, 35(9), pp. 941–949. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00019-7)
- Jin, X., et al. (2024). Humidity-Controlling Ceramic Bricks: Enhancing Evaporative Cooling Efficiency to Mitigate Urban Heat Island Effect. *Atmosphere*, 15(8), 964. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos15080964>
- Diz-Mellado, E., et al. (2025). Parameter-based optimization of the 3D clay-printability. *Case Studies in Construction Materials*, 23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05377>
- Diz-Mellado, E., et al. (2024). Enhancing 3D-Printed Clay Models for Heritage Restoration Through 3D Scanning. *Applied Sciences*, 14, 10898. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142310898>
- Hu, F., et al. (2021). Extrusion-based 3D printing of ceramic pastes: Mathematical modelling and in situ shaping retention approach. *Materials*, 14(5), 1137. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14051137>
- Wang, Y., et al. (2024). State-of-the-art research progress and challenge of the printing techniques, potential applications for advanced ceramic materials 3D printing. *Materials Today Communications, Volume 40*. 110001. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110001>
- Pelanconi, M., et al. (2019). Thermal design, optimization and additive manufacturing of ceramic regular structures to maximize the radiative heat transfer. *Materials & Design*, 163, 107539. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107539>
- Cruz, P. J. S., et al. (2020). Additive manufacturing of ceramic components for façade construction. *Journal of Facade Design and Engineering*, 8(1), pp. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.7480/jfde.2020.1.4725>

Yin, X., et al. (2023). The State of the Art in Digital Construction of Clay Buildings: Reviews of Existing Practices and Recommendations for Future Development. *Buildings*, 13, pp. 2381. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13092381>

Cultrone, G., et al. (2020). Sawdust recycling in the production of lightweight bricks: How the amount of additive and the firing temperature influence the physical properties of the bricks. *Construction and Building Materials*, 235, 117436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117436>

Muñoz, P., et al. (2019). Thermal and mechanical properties of fired clay bricks made by using grapevine shoots as pore forming agent: Influence of particle size and percentage of replacement. *Construction and Building Materials*, 224, pp. 639–658. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.066>

Khan, Z., et al. (2021). Utilization of marble wastes in clay bricks: A step towards lightweight energy efficient construction materials. *Civil Engineering Journal*, 7(9), pp. 1488–1500. DOI: <https://doi.org/10.28991/CEJ-2021-03091738>

Munir, M. J., et al. (2018). Thermally efficient fired clay bricks incorporating waste marble sludge: An industrial-scale study. *Journal of Cleaner Production*, 174, pp. 1122–1135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.060>

Casa dentro de una casa, o como habitar una cochiguera.

House within a House, or how to dwell in a pigsty.

ÁLVARO MORAL GARCÍA/ Universidad de Valladolid

DANIEL GONZÁLEZ GARCÍA/ Universidad de Valladolid

Palabras clave Keywords

Habitar, domesticidad, Madera Laminada, Reversibilidad, Reciclaje.

To Dwell, domesticity, Laminated Timber, Reversibility, Recycling.

Resumen

Esta comunicación presenta la rehabilitación de una antigua edificación agropecuaria en el casco histórico de Sasamón (Burgos), transformada en vivienda unifamiliar. El proyecto nace como respuesta al fenómeno de la "España vacía", proponiendo un retorno a las raíces mediante el reciclaje de arquitecturas olvidadas. La intervención respeta la volumetría y los muros de adobe originales, testigos de una economía de subsistencia, actuando únicamente en el interior mediante una operación de vaciado y ocupación.

La estrategia proyectual introduce una "caja" de madera laminada laminada que funciona como un mueble habitable, independiente y reversible, generando un hábitat mínimo dentro de la ruina consolidada. Esta dualidad material permite leer la intervención como una capa más en la historia del edificio. Constructivamente, se prioriza la sostenibilidad y la economía circular, empleando aislamiento continuo y colaborando con empresas locales para reducir la huella de carbono. El resultado es un diálogo sincero entre la memoria rural y el confort contemporáneo, cosiendo el tejido urbano sin imponerse a él.

Abstract

This paper presents the rehabilitation of an old agricultural building in the historic center of Sasamón (Burgos), transformed into a single-family home. The project emerges as a response to the "Empty Spain" phenomenon, proposing a return to roots by recycling forgotten architectures. The intervention respects the original volume and adobe walls, witnesses of a subsistence economy, acting solely on the interior through an operation of emptying and re-occupying.

The design strategy introduces a laminated timber "box" that functions as a habitable piece of furniture, independent and reversible, generating a minimum habitat within the consolidated ruin. This material duality allows the intervention to be read as just another layer in the building's history. Constructively, sustainability and circular economy are prioritized by using continuous insulation and collaborating with local companies to reduce the carbon footprint. The result is a sincere dialogue between rural memory and contemporary comfort, stitching the urban fabric without imposing upon it.

Introducción: El Origen y el contexto



Figura 1. La casa dentro de la casa. Fotografía: Javier Bravo.

En el panorama contemporáneo, la arquitectura se enfrenta ineludiblemente a la dicotomía irresoluta de La España *llena/vacía*, una polaridad que trasciende la mera estadística demográfica para convertirse en una condición existencial de nuestro territorio, del paisaje y de nuestra sociedad. Frente a la saturación de la urbe, surge una pulsión atávica, una necesidad de "*volver a las raíces, al pueblo*", no como un acto de renuncia nostálgica, sino como una estrategia proactiva de reocupación y elección de un nuevo modo de vida enraizado con los lazos familiares, vecinales y con la promesa de una vida en contacto directo con la naturaleza y el patrimonio. Sasamón, en este contexto, no es solo una localización geográfica, sino el escenario de una resistencia silenciosa; un tejido histórico protegido donde la arquitectura ha dejado de ser un instrumento de expansión para convertirse en una herramienta de sutura. El proyecto se inserta en esta realidad para interrogar las posibilidades de habitar lo que ha quedado al margen, entendiendo que el retorno al origen exige una nueva mirada sobre lo vernáculo, despojándolo de folclorismos para recuperar su esencia operativa y su capacidad de refugio en un mundo cada vez más incierto.

El escenario de intervención se ve condicionado por una realidad administrativa compleja. El casco histórico de Sasamón, declarado Bien de Interés Cultural (BIC) en la categoría de Conjunto Histórico en diciembre de 2020, encarna una contradicción latente. Si bien esta figura legal reconoce la estratigrafía histórica de la villa —vinculada a calzadas romanas y al Camino de Santiago—, su implementación ha generado una "fricción normativa" con efectos colaterales adversos. La rigidez de los instrumentos de protección y la excesiva burocratización de los trámites han derivado, paradójicamente, en una parálisis

de la iniciativa privada. Lejos de garantizar la conservación, los estrictos requerimientos sectoriales han precipitado una oleada de abandonos o, en su defecto, la proliferación de actuaciones "invisibles", ejecutadas sin licencia ante la imposibilidad técnica y económica de cumplir con los estándares impuestos. Se produce así un choque frontal entre la superestructura legal y la urgencia doméstica: una población que desea proteger su patrimonio pero que se ve incapacitada para hacerlo, atrapada en un marco legislativo que, al intentar congelar la historia, dificulta involuntariamente su continuidad viva.

Frente a este bloqueo institucional, la respuesta arquitectónica renuncia a la monumentalidad para abrazar una estrategia de mínimos. Bajo esta óptica, la sostenibilidad, es entendida aquí no como un sello tecnocrático sino como una ética de la escasez, nos obliga a "*reciclar*" no solo materiales, sino atmósferas y contenedores espaciales alejados de un uso contemporáneo útil. El verdadero desafío reside en aprovechar un espacio de una actividad en desuso, un espacio abandonado condenado al olvido, transformando la obsolescencia funcional de una antigua cochiguera en una oportunidad habitacional contemporánea. Esta operación implica una especulación sobre la reversibilidad y la permanencia; se trata de intervenir en un edificio carente de valor monumental específico mediante una superposición. Al ocupar estos vacíos residuales, la arquitectura deja de ser un objeto autista para convertirse en un parásito simbiótico cuyo propósito es reactivar la memoria material del lugar, demostrando que la vanguardia constructiva puede, y debe, anidar en la cáscara de la tradición sin destruirla, reivindicando la dignidad de lo infraordinario.



Figura 2. Contexto urbano de la intervención. Fotografía: Javier Bravo.

Analisis de la preexistencia

El objeto de intervención no es un edificio concebido desde la representatividad doméstica, sino un artefacto servil, una infraestructura vinculada históricamente a una economía de subsistencia. Su materialidad narra la biografía áspera del trabajo rural: un contenedor que sirvió de almacén de paja, refugio de ganado y cobertizo de maquinaria, erigido mediante una arquitectura popular, anónima pero obstinadamente persistente. Esta "caja hueca" original se define por una volumetría elemental y una tectónica sincera: muros de carga de adobe que descansan sobre arranques de sillería pétreo y se coronan con una cubierta a dos aguas con una estructura de madera. Contaba, además, con una crujía intermedia con un pilar y una viga de gran porte. Estos paramentos, de materialidad tosca y presencia discreta, actúan como testigos callados del pasado, configurando un recinto donde la rugosidad de la tierra cruda y la pátina del tiempo no son patologías a ocultar, sino el sustrato esencial sobre el que debe operar nuestra arquitectura contemporánea. Por ello nuestra intervención intenta desde el punto de partida en mantener estos muros, siendo los testigos más importantes, garantes de la morfología urbana y del concepto constructivo originario de la edificación

La aproximación al patrimonio en este contexto trasciende la preservación museística para adentrarse en la necesidad de "coser el tejido urbano tradicional". Nos enfrentamos a un edificio carente de valor monumental específico, cuya relevancia no reside en su singularidad estilística, sino en su capacidad para configurar la escena urbana y mantener la continuidad de la trama histórica de Sasamón. La intervención se plantea, por tanto, como un ejercicio de respeto, intimidad y continuidad, rechazando tanto la tabula rasa como el mimetismo folclórico. La estrategia consiste en preservar la huella construida y sus muros perimetrales, validando la ruina no por lo que fue, sino por su potencial como envolvente protectora. Se trata de una operación de consolidación que permite leer la intervención futura como una prolongación circunstancial, asumiendo que la mejor manera de honrar la memoria material del lugar es otorgarle una nueva utilidad que garantice su supervivencia sin desvirtuar su carácter austero.

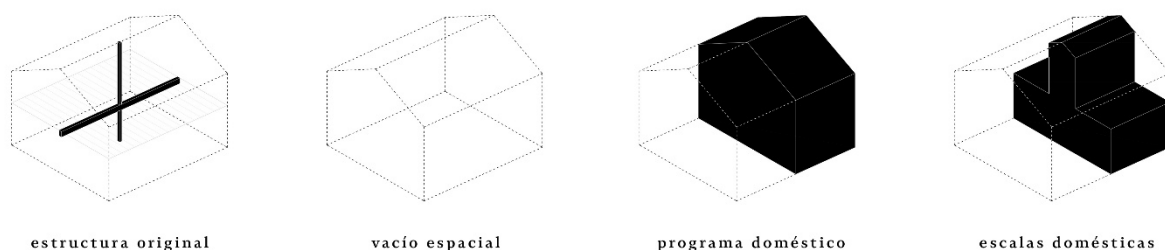


Figura 3. Estrategia proyectual. Dibujo de los autores.

En consecuencia, la intervención establece como axioma de partida la preservación estricta de la envolvente perimetral. Los muros de carga originales no solo se restauran en su cara externa para mantener la lectura urbana, sino que se reconfiguran desde el interior: se ejecuta una nueva fábrica que permite el engrosamiento de la sección constructiva, integrando un aislamiento continuo indispensable para alcanzar los estándares de eficiencia energética contemporáneos. Por el contrario, la cubierta demanda una sustitución integral; la estructura de madera existente se elimina junto con la cubrición de chapa—severamente deteriorada y fruto de una intervención moderna, desafortunada en su ejecución y ajena a la normativa patrimonial vigente—. Esta operación de limpieza radical libera el volumen, dejando el interior "vacío", convertido en un contenedor expectante que aguarda la colonización del nuevo programa doméstico.

Estrategia proyectual: Casa dentro de una casa

La premisa proyectual, ya intuita, se ejecuta con una claridad quirúrgica: conservar la memoria material del lugar exige, paradójicamente, una tabula rasa interior. Se procede al vaciado completo del edificio, liberando el espacio de sus particiones obsoletas para revelar la potencia espacial del contenedor original. Los muros perimetrales permanecen como testigos callados de su biografía agrícola, transformándose en una cáscara protectora que aguarda un nuevo organismo. Esta liberación busca una cierta monumentalidad del vacío, en contraste con los nuevos elementos donde lo doméstico pueda reinsertarse sin entrar en conflicto con la escala agraria de la preexistencia.

En el interior de esta ruina consolidada se introduce una nueva estructura: una "caja" de madera laminada que opera conceptualmente como un mueble habitable. Esta pieza, de manufactura industrial y precisión milimétrica, realizada en taller, no busca fusionarse con la imperfección del adobe, sino que se posa en el espacio con autonomía, ocupando estrictamente la mitad del volumen disponible. Se trata de la construcción de un hábitat mínimo, un espacio poco definido, pero altamente específico, donde el mueble no es un accesorio, sino el elemento que densifica y reta el espacio vacío. La caja se despliega y se repliega mediante un sistema de grandes puertas abatibles y correderas, permitiendo una flexibilidad programática que diluye los límites entre las estancias y convierte la vivienda en un mecanismo de flexibilidad dura (Schneider & Till, 2007) a los ritmos variables de la vida contemporánea.

La inserción de este volumen autónomo desencadena una dialéctica espacial y material compleja: una tensión entre lo viejo y lo nuevo, entre la gravedad de lo opaco y la levedad de lo liviano, entre la aspereza de la ruina y la calidez del mueble. La caja se adosa y se retrae respecto al perímetro murario, generando una serie de intersticios por donde el espacio 'respira'. Lejos de la colisión, se establece un preciso diálogo de distancias que oscilan entre la fricción milimétrica y la holgura métrica. La luz resbala a través de esta nueva geometría, activando la atmósfera del recinto y subrayando la cesura entre el continente histórico y el contenido contemporáneo. Bajo la estrategia de 'casa dentro de una casa', se

logra habitar la antigua cochiguera sin sacrificar el confort, amplificando su genética rural mediante una lectura actual que otorga al espacio una inédita cualidad térmica y visual: una atmósfera profundamente doméstica que permanece, no obstante, respetuosamente emancipada de la envolvente original.

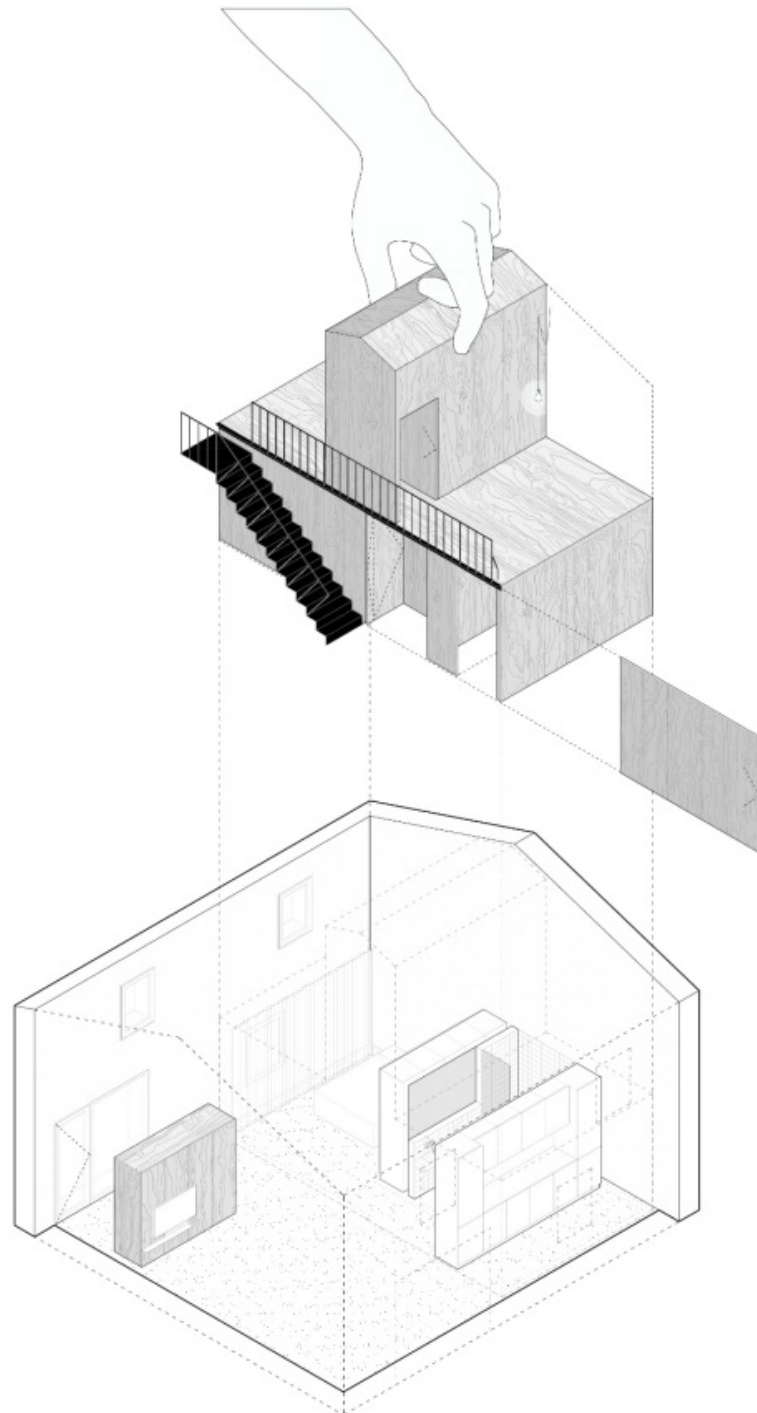


Figura 4. Axonometría proyectual. Dibujo de los autores.



Figura 5. Lleno y vacío, la dualidad del nuevo espacio generado. Fotografía: Javier Bravo.

Materialidad y sostenibilidad



Figura 6 y 7. Materialidad interior Fotografía: Javier Bravo.

La materialización del proyecto trasciende la mera selección de acabados para convertirse en un manifiesto sobre la sostenibilidad territorial. En un contexto marcado por la despoblación, "construir en proximidad" se erige como un imperativo ético y logístico. La caja de madera, ejecutada con una estructura maciza de madera laminada, no es un elemento foráneo, sino el resultado de una colaboración estrecha con la industria local especializada (Medgon y Escribano Collantes), fomentando la conexión con los oficios del territorio rural. Esta estrategia de prefabricación modular permitió reducir drásticamente la huella de transporte y los tiempos de ejecución, insertando una precisión industrial en el corazón de una edificación antigua. Asimismo, la cubierta ha sido completamente renovada reinterpretando el sistema tradicional de par e hilera mediante madera laminada, sustituyendo los antiguos rollizos por un sistema racionalizado, realizado por la misma industria, que asegura la estabilidad sin traicionar la lógica estructural vernácula.

Desde la perspectiva del comportamiento físico, la intervención persigue un alto estándar de eficiencia energética, entendiendo el confort como una conquista técnica invisible. La estrategia se materializa mediante un trasdosado continuo de aislamiento proyectado sobre toda la envolvente interior, una segunda piel oculta que garantiza la continuidad térmica y elimina los puentes térmicos habituales en la rehabilitación de muros de carga. Sobre este aislamiento se dispone un tabicón que recibe el mismo mortero monocapa de acabado rugoso utilizado en el exterior, una decisión que permite una lectura continua de lo antiguo ya sea desde fuera o desde dentro, y establece un lenguaje matérico coherente dentro y fuera. Igualmente se sustituyen todas las carpinterías existentes por unas de aluminio RPT y correderas elevables en el caso de las antiguas aberturas de carruajes. De este modo, se optimiza el comportamiento energético reduciendo las pérdidas, mientras que el sistema de climatización se resuelve mediante suelo radiante, oculto bajo la solera, que aporta la inercia térmica necesaria para habitar un volumen de estas características.

La ética del proyecto radica, por tanto, en una nueva "sinceridad constructiva", en un nuevo nuevo-brutalismo (Banham, 1966), no vinculado aquí a los nuevos materiales sino a la sinceridad constructiva de los ya existentes en contraste con los nuevos. La intervención renuncia a la cosmética arquitectónica: no se han introducido más acabados que los estrictamente necesarios para la habitabilidad. La madera estructural de la caja se deja vista, asumiendo su doble condición de soporte y revestimiento; los

paramentos verticales se resuelven con el citado mortero continuo, y el plano horizontal se ejecuta mediante un pavimento de resina transparente vertido directamente sobre la solera de hormigón. Esta desnudez material no pretende ocultar el origen rural del edificio, sino amplificarlo mediante una lectura contemporánea. La austeridad de los materiales nuevos dialoga con la tosquedad de los viejos, generando una atmósfera donde la textura y la luz son los únicos ornamentos, y donde la arquitectura se explica a sí misma sin artificios.

Conclusiones: Reversibilidad y futuro.

Finalmente, el proyecto arroja una pregunta sobre las formas contemporáneas de habitar lo rural. Frente a la indeterminación espacial del contenedor original —un "espacio poco cualificado" pensado para el animal o la máquina—, la intervención propone la construcción de un hábitat mínimo donde la arquitectura se retrae para ceder protagonismo al equipamiento, al soporte (Habraken, 1979). Es "el mueble el que define y habita el espacio", aportando lo específico, lo táctil, lo poroso (Boer, 2023) y lo ergonómico. Esta estrategia valida la posibilidad de una vida doméstica sofisticada en el corazón de la España vacía, demostrando que la recuperación demográfica no pasa necesariamente por la mimesis de la vivienda urbana, sino por la invención de nuevos dispositivos habitacionales capaces de colonizar la obsolescencia.

La operación se cierra con una defensa de la "reversibilidad". Al concebir la ampliación como un objeto arquitectónico autónomo —una caja ensamblada en seco—, se plantea la posibilidad teórica de su retirada futura, devolviendo al edificio a su estado de ruina consolidada. Esta cualidad efímera redefine el concepto patrimonial en un edificio que, si bien carece de valor artístico específico, es fundamental para coser el tejido tradicional. La intervención no se funde irreversiblemente con la preexistencia, sino que la ocupa temporalmente. Así, esta transformación no pretende ocultar el origen rural, sino respetarlo estableciendo un modelo de actuación donde lo nuevo protege a lo viejo precisamente porque no lo toca, permitiendo que la arquitectura vernácula siga respirando mientras acoge, en su vientre, las necesidades de un tiempo nuevo.



Figura 8 y 9. Mobiliario y dormitorio. Fotografía: Javier Bravo.

Agradecimientos

Gracias a Roberto y Pilar por dejar en nuestras manos su espacio vital.

Referencias

Banham, R. (1966). *The New Brutalism: Ethic or Aesthetic?* The Architectural Press.

Boer, R. (2023). *Smooth City. Against urban perfection, towards collective alternatives*. Valiz.

Habraken, N. J. (1979). *El diseño de soportes*. Gustavo Gili.

Schneider, T., & Till, Jeremy. (2007). *Flexible housing* [Book]. Architectural Press, an imprint of Routledge.

Silencios habitables: Hacia una economía circular de la escucha.

Habitable Silences Towards a Circular Economy of Listening.

ALEJANDRA JIMÉNEZ LÓPEZ/ Universidad de Sevilla

TOMÁS GARCÍA GARCÍA/ Universidad de Sevilla

Palabras clave Keywords

Silencio urbano, ecología acústica, espacio público, bienestar colectivo, cartografía sonora.

Urban silence, acoustic ecology, public space, collective well-being, sound mapping.

Resumen

El derecho a una vivienda digna, recogido en la Constitución española de 1978, ha guiado durante décadas las políticas habitacionales y urbanas del país. Sin embargo, la creciente complejidad ambiental y social de las ciudades exige ampliar ese marco hacia un derecho a habitar que contemple no solo el acceso a un techo, sino también la calidad sensorial, climática y acústica del entorno urbano. En este contexto surge la propuesta de una economía circular de la escucha, orientada a reconocer el silencio y el confort en el espacio público como dimensiones fundamentales de la salud pública y del bienestar colectivo. La investigación se desarrolla en el centro histórico de Jerez de la Frontera, entendido como laboratorio urbano para cartografiar refugios sonoros y climáticos. Se aplica una metodología mixta que combina mediciones acústicas, análisis morfológicos, entrevistas ciudadanas y la creación de una aplicación móvil para mapear percepciones sonoras en tiempo real.

Los resultados evidencian la existencia de “paisajes del silencio” con potencial regenerador, así como patologías recurrentes vinculadas al ruido del tráfico, la reverberación y la falta de sombra. Las intervenciones propuestas son ligeras, circulares y contextuales. El artículo concluye defendiendo el derecho al espacio público digno, saludable y habitable como un derecho emergente del siglo XXI.

Abstract

The right to adequate housing established in the 1978 Spanish Constitution has traditionally guided urban policies in Spain. However, the increasing environmental and social complexity cities demands a broader framework: a right to inhabit one that addresses not only access to shelter but also the sensory, climatic and acoustic quality of public space. Within this perspective emerges the proposal for a circular economy of listening aimed at recognizing silence and acoustic comfort as essential components of public health and collective well-being.

The research focuses on the historic center of Jerez de la Frontera, conceived as an urban laboratory for identifying sonic and climatic refuges. A mixed methodology is applied combining acoustic measurements, spatial and material analyses, citizen interviews, and the development of a mobile application that maps sonic perceptions in real time.

Findings reveal the presence of “silence landscapes” with regenerative potential, alongside recurring urban pathologies linked to traffic noise, reverberation and lack of shade. The proposed interventions are light, circular and context-sensitive. The article argues for the recognition of the right to dignified healthy and habitable publicspace as an emerging urban right of the 21st century.

1. Introducción: del derecho a la vivienda al derecho a habitar

La Constitución Española de 1978 consagró el derecho a una vivienda digna y adecuada como uno de los pilares fundamentales del bienestar social. Sin embargo, más de cuarenta años después, la complejidad ambiental y sensorial de las ciudades exige ampliar ese marco conceptual hacia un derecho a habitar, entendido como un proceso que supera la mera provisión de un techo. Habitar implica disponer de un entorno urbano saludable, accesible, climáticamente confortable y acústicamente equilibrado.

La creciente evidencia sobre los efectos del ruido y del calor extremo en la salud pública ha hecho visible una carencia fundamental: las políticas urbanas han prestado atención al espacio físico, pero han ignorado las atmósferas que lo hacen vivible. En este contexto, el silencio emerge como un bien común escaso, frágil y profundamente vinculado con la calidad de vida.

La propuesta que este artículo desarrolla —los “silencios habitables”— plantea la necesidad de reconocer el silencio como una dimensión esencial de la habitabilidad contemporánea. Este enfoque incorpora criterios acústicos, climáticos y sensoriales al diseño urbano, entendiendo que la escucha y la percepción del entorno son parte del derecho a la ciudad. Desde esta perspectiva, el espacio público digno se define no solo por su funcionalidad o accesibilidad, sino también por su capacidad de ofrecer bienestar atmosférico.

2. Marco conceptual: hacia una ecología acústica del habitar

La Organización Mundial de la Salud (OMS) reconoce el ruido ambiental como uno de los principales contaminantes físicos que afectan a la salud pública. Según sus directrices (*Environmental Noise Guidelines for the European Region*, 2018), la exposición continuada a niveles elevados de ruido está directamente relacionada con trastornos del sueño, estrés crónico, deterioro cognitivo en población infantil y un incremento significativo del riesgo de enfermedades cardiovasculares.



Figura 1. Flujos de movimiento en horario de tarde en la plaza del Arenal, Jerez de la Frontera. Dibujo de elaboración propia.

Paralelamente, los fenómenos climáticos extremos —especialmente las olas de calor— han impulsado la aparición del concepto de refugios climáticos, espacios públicos accesibles donde la ciudadanía puede protegerse en condiciones de vulnerabilidad. Lo que este trabajo propone es un salto conceptual: reconocer también los refugios sonoros, entendidos como espacios urbanos de baja densidad acústica, donde el silencio se convierte en un recurso ambiental y social.

Este enfoque se sustenta en la ecología acústica, disciplina que estudia las relaciones entre los seres humanos y su entorno sonoro. A diferencia de la tradicional “lucha contra el ruido”, la ecología acústica promueve una mirada más amplia, centrada en la escucha activa, la percepción cualitativa y el equilibrio entre sonidos naturales, urbanos y sociales.

Desde esta perspectiva, la ciudad deja de ser únicamente un soporte físico para convertirse en un ecosistema de experiencias, donde la salud colectiva se relaciona directamente con la calidad de las atmósferas que habitamos.

3. Jerez de la Frontera como laboratorio acústico

El centro histórico de Jerez de la Frontera fue seleccionado como caso de estudio debido a su morfología singular: plazas cerradas, calles estrechas, pasajes sombreados, patios interiores y vacíos urbanos con características acústicas diferenciadas. Esta condición lo convierte en un terreno idóneo para analizar cómo geometría, materiales y vegetación influyen en la propagación del sonido.



Figura 2. Imagen de la plaza de la Asunción. Jerez de la Frontera. Fotografía de elaboración propia.

Jerez, además, presenta un fenómeno particular: la coexistencia de áreas altamente ruidosas —derivadas del tráfico, el turismo y actividades comerciales— con espacios inesperadamente silenciosos. Este contraste constituye el punto de partida para la identificación de refugios sensoriales: lugares donde la densidad acústica es baja y el confort térmico y ambiental es notable.



Figura 3. Imagen de la plaza Plateros. Jerez de la Frontera. Fotografía de elaboración propia.

La investigación permitió descubrir que estos refugios no son anomalías ni residuos urbanos, sino oportunidades estratégicas para promover una habitabilidad más humana. Su gestión y activación pueden contribuir a mejorar la experiencia urbana, a reducir el estrés colectivo y a promover nuevas formas de apropiación del espacio público.



Figura 4. Plano con indicación de las plazas más relevantes de Jerez de la Frontera. Dibujo de elaboración propia.

4. Metodología: medir, observar, participar

La investigación desarrollada en el centro histórico de Jerez de la Frontera se basó en una metodología mixta que combina análisis cuantitativo, observación cualitativa y participación ciudadana. Este enfoque integral permite comprender el paisaje sonoro no solo desde su dimensión física, sino también desde su percepción y su valor social.

4.1. Medición acústica y análisis espacial

El primer nivel de análisis consistió en la realización de mediciones sonoras mediante sonómetros portátiles, siguiendo criterios de evaluación establecidos por la normativa vigente. Las mediciones se efectuaron en distintos momentos del día, distinguiendo periodos diurnos y vespertinos, para obtener un perfil acústico representativo de las distintas plazas y calles del centro histórico.

Estas mediciones se relacionaron posteriormente con la morfología urbana, analizando:

- geometrías (plazas recogidas, calles estrechas, patios interiores),
- materiales predominantes (pavimentos pétreos, fachadas reflectantes),
- presencia y tipo de vegetación,
- grado de exposición solar y disponibilidad de sombra.

Este cruce de variables permitió identificar patrones que influyen directamente en la propagación o atenuación del sonido urbano.

4.2. Observación comportamental y usos del espacio

El segundo componente metodológico consistió en el registro audiovisual de los usos del espacio público. Se analizaron:

- patrones de movilidad peatonal,
- permanencias y actividades,
- comportamientos asociados al descanso, la espera o la conversación,
- coexistencia entre flujos ruidosos y espacios silenciosos.

La observación prolongada permitió reconocer microdinámicas urbanas que no se detectan a partir de datos cuantitativos, mostrando cómo determinadas configuraciones espaciales favorecen la aparición espontánea de refugios sensoriales.

4.3. Percepción ciudadana: entrevistas y escucha activa

La dimensión cualitativa se reforzó mediante entrevistas semiestructuradas a residentes, trabajadores y visitantes del área de estudio. Las preguntas se centraron en:

- percepción del ruido,
- sensación de confort o incomodidad,
- lugares donde buscan silencio, sombra o descanso,
- valoración general del espacio público.

Las respuestas mostraron una tendencia clara: existe una conciencia ciudadana emergente sobre la importancia del silencio y el bienestar acústico en la vida cotidiana. Estas percepciones enriquecieron el diagnóstico técnico, alineando la investigación con un enfoque social del habitar.

4.4. Herramientas digitales: una aplicación para cartografiar la escucha

Como parte de la metodología, se busca desarrollar una APP colaborativa que permita a los ciudadanos registrar sonidos, opiniones y sensaciones en tiempo real. Esta herramienta convierte la escucha urbana en un acto colectivo, donde cada usuario contribuye a generar un mapa vivo del confort sonoro de la ciudad.

La APP se concibe como un instrumento de participación, educación y gobernanza urbana. Su uso permitirá:

- visibilizar zonas de conflicto acústico,
- identificar patrones atmosféricos,
- detectar refugios sensoriales emergentes,
- fomentar una cultura ciudadana de la escucha.

5. Resultados: paisajes del silencio y patologías acústicas

El análisis conjunto de mediciones, observación, entrevistas y registros ciudadanos permitió identificar un repertorio diverso de situaciones acústicas en el centro histórico de Jerez de la Frontera. Estas situaciones se agrupan en dos grandes categorías: patologías acústicas (espacios donde el ruido y la reverberación generan malestar) y refugios sensoriales o paisajes del silencio (espacios donde la atmósfera sonora resulta confortable y equilibrada).

5.1. Patologías acústicas del espacio público

Las mediciones realizadas en plazas y calles de mayor exposición viaria revelaron valores superiores a los límites recomendados por la OMS, especialmente en franjas diurnas con intensa actividad comercial. Las principales patologías detectadas fueron:

a) Ruido de tráfico y reverberación

Las calles estrechas con fachadas rígidas y pavimentos pétreos intensifican la propagación del sonido. Se observaron fenómenos de reverberación prolongada, especialmente en espacios urbanos con alta densidad de vehículos.

b) Hiperactividad sonora en nodos comerciales

En zonas asociadas al turismo y a la hostelería se registraron fluctuaciones sonoras de corta duración, pero alta intensidad, generando saturación sensorial. Las entrevistas revelaron que residentes y trabajadores perciben estos puntos como “estresantes” o “agotadores”.

c) Falta de sombra y confort térmico

Aunque no estrictamente acústica, la ausencia de sombra en determinados espacios incrementó la percepción de malestar general. Como muestran estudios recientes, el estrés térmico amplifica la percepción negativa del ruido, reforzando la necesidad de un enfoque conjunto acústico-climático.

d) Mobiliario y pavimentos que amplifican el ruido

Se detectaron pavimentos altamente reflectantes y mobiliario metálico que generan impactos sonoros repetitivos. Estos elementos contribuyen a un ambiente poco confortable para la estancia o la conversación.



Figura 5. Plano con abstracción de los movimientos y estados de la Plaza de las Angustias. Dibujo de elaboración propia.

5.2. Paisajes del silencio: identificación de refugios sensoriales

Frente a estas patologías, la investigación permitió reconocer una red dispersa de espacios donde el silencio emerge como condición ambiental relevante. Los criterios empleados para identificarlos fueron:

- Niveles sonoros inferiores a los observados en sus entornos próximos
- Buena presencia de sombra o microclimas estables
- Geometrías que atenúan o distribuyen el sonido suavemente
- Vegetación que actúa como filtro acústico y climático
- Sensación de refugio expresada en las entrevistas

Entre los ejemplos más representativos destacan:

a) Plazas interiores y patios ocultos

Espacios con un perímetro cerrado y vegetación central muestran un equilibrio notable entre actividades humanas, sombra y silencio. La ciudadanía los describe como lugares “de pausa”, “respiraderos” o “sitios donde desconectar”.

b) Pasajes sombreados y callejones estrechos

Algunos pasajes presentan niveles sonoros sorprendentemente bajos, debido a la ausencia de tráfico y al efecto de cámara acústica suave generada por su geometría.

c) Entornos con alta densidad vegetal

Árboles de copa amplia, jardines interiores y pequeños parques amortiguan tanto el ruido como la temperatura. Su función como “refugio climático” se asocia directamente al confort acústico.

Estos refugios sensoriales, lejos de ser vacíos urbanos anecdóticos, revelan un sistema latente de habitabilidad que puede potenciarse mediante intervenciones ligeras y circulares.



Figura 6. Flujo de movimientos en horario de mañana en la plaza de las Angustias. Dibujo de elaboración propia.

6. Intervenciones circulares: reparar el sonido, habitar el clima

En coherencia con la metodología y los resultados, las propuestas de intervención se fundamentan en criterios de ligereza, reversibilidad, circularidad y adaptación contextual. No se plantean grandes obras, sino acciones capaces de mejorar la experiencia acústica y climática del espacio urbano sin alterar su esencia histórica.

6.1. Pacificación viaria y redirección de flujos

Reducir el tráfico en calles clave del centro histórico mejoraría significativamente la calidad sonora percibida. La pacificación no se concibe únicamente como una medida de movilidad, sino como un mecanismo de reparación atmosférica.

6.2. Barreras vegetales y microclimas urbanos

La introducción de árboles de sombra y franjas verdes genera beneficios acústicos y climáticos al mismo tiempo. Estas barreras vivas actúan como filtros naturales, reducen la reverberación y aportan confort térmico.

6.3. Pavimentos absorbentes y materiales acústicamente amables

Sustituir pavimentos altamente reflectantes por soluciones absorbentes puede mitigar el impacto del tránsito peatonal y mejorar la calidad acústica del entorno. El uso de materiales circulares y reciclados se alinea con una economía circular de la escucha.

6.4. Mobiliario ergonómico y distribuido estratégicamente

La ubicación de bancos, apoyos y elementos de descanso en zonas silenciosas potencia su uso y favorece la apropiación social de estos refugios. El mobiliario debe acompañar la escucha, no interferirla.

6.5. Activaciones culturales temporales

Intervenciones ligeras como microconciertos, performances sonoras o instalaciones efímeras pueden revelar la dimensión acústica del espacio público, educando a la ciudadanía en una cultura de la escucha activa.

7. Discusión: hacia un nuevo derecho al espacio público digno

Los resultados de esta investigación sugieren la necesidad de ampliar la definición tradicional de habitabilidad urbana. Si a finales del siglo XX el derecho prioritario fue el acceso a la vivienda, hoy las ciudades enfrentan retos que exceden la dimensión estrictamente arquitectónica: ruido, calor, estrés sensorial y degradación ambiental.

En este contexto, el derecho al espacio público digno debe incluir:

- Silencio y confort acústico como componentes de salud pública
- Sombra y microclimas que mitiguen el estrés térmico
- Atmósferas sensoriales cuidadas y equilibradas
- Participación ciudadana en la monitorización y gestión del paisaje sonoro

El concepto de economía circular de la escucha propuesto en esta investigación ofrece un marco teórico para integrar estas dimensiones. Se trata de asumir que el sonido es un recurso

urbano que debe gestionarse, equilibrarse y redistribuirse, igual que se hace con la energía, el agua o los materiales.

8. Conclusiones

La investigación desarrollada en el centro histórico de Jerez de la Frontera demuestra que el silencio no es una ausencia, sino un recurso urbano esencial para la salud, la habitabilidad y el bienestar colectivo. Los paisajes del silencio identificados —plazas interiores, pasajes sombreados, patios y enclaves vegetales— revelan la existencia de una estructura latente de refugios sonoros y climáticos que ya forma parte de la ciudad, aunque permanezca invisibilizada por las dinámicas dominantes del ruido y el tráfico. Activar estos refugios no requiere grandes transformaciones, sino intervenciones ligeras, sensibles y circulares que devuelvan a los espacios públicos su dimensión atmosférica.

La metodología empleada, combinando mediciones acústicas, observación comportamental y entrevistas a usuarios del espacio urbano, ha permitido comprender el paisaje sonoro desde sus dimensiones física, perceptiva y social. En este marco, la creación de una APP colaborativa se plantea como un futuro desarrollo destinado a democratizar la escucha y favorecer la participación ciudadana en la identificación de conflictos acústicos y en la detección de refugios sensoriales. Su potencial reside en ofrecer una cartografía viva de percepciones urbanas, ampliando el alcance de las metodologías tradicionales y acercando a la ciudadanía al proceso de construcción del espacio público.

A partir de estos hallazgos, se hace evidente que el derecho al espacio público digno debe ampliarse para incorporar el silencio, la sombra y el confort atmosférico como componentes fundamentales de la habitabilidad contemporánea. Si el derecho a la vivienda orientó las políticas urbanas del siglo XX, el derecho a un espacio público saludable y habitable se perfila como el nuevo horizonte del siglo XXI. Avanzar hacia una arquitectura circular de la escucha implica reconocer que habitamos atmósferas antes que geometrías, y que el diseño urbano debe atender no solo a los materiales y formas, sino también a las experiencias sensoriales que sostienen la vida colectiva.

Agradecimientos

El autor desea expresar su agradecimiento al Excmo. Ayuntamiento de Jerez de la Frontera por las facilidades prestadas para el desarrollo del trabajo de campo y el acceso a información de interés para la investigación. Asimismo, se agradece al Colegio Oficial de Arquitectos de Cádiz su apoyo institucional y la colaboración brindada en el marco de esta investigación. Igualmente, se reconoce la participación de los vecinos y usuarios del centro histórico de Jerez de la Frontera, cuyas aportaciones han sido fundamentales para la comprensión del paisaje sonoro urbano.

Referencias

Augoyard, J.-F., & Torgue, H. (2006). *Sonic experience: A guide to everyday sounds*. Montreal: McGill-Queen's University Press.

Blessner, B., & Salter, L.-R. (2007). *Spaces speak, are you listening? Experiencing aural architecture*. Cambridge, MA: MIT Press.

Borja, J., & Muxí, Z. (2003). *El espacio público: Ciudad y ciudadanía*. Barcelona: Electa.

European Environment Agency. (2020). *Environmental noise in Europe 2020* [en línea]. [Consultado el 2 de diciembre de 2025]. Recuperado de <https://www.eea.europa.eu>

Ingold, T. (2011). *Being alive: Essays on movement, knowledge and description*. London: Routledge.

- Kang, J., & Schulte-Fortkamp, B. (2016). Soundscape and the built environment. *Applied Acoustics*, 110, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.07.012>
- Klemm, W., Heusinkveld, B., Lenzholzer, S., & van Hove, B. (2015). Street greenery and its cooling effects in a Mediterranean climate. *Landscape and Urban Planning*, 134, 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.010>
- LaBelle, B. (2010). Acoustic territories: Sound culture and everyday life. En J. Sterne (ed.), *The sound studies reader* (pp. 186–199). New York: Routledge.
- Lefebvre, H. (1968). *Le droit à la ville*. Paris: Anthropos.
- Otero, J., Manzano, E., & Roca, D. (2019). Confort acústico y calidad urbana: una revisión crítica. *Revista de Acústica*, 50(3), 12–27. <https://doi.org/10.14201/acu.2019.50312>
- Pardo, A. (2023, 12 de julio). Las ciudades europeas aceleran la creación de refugios climáticos ante olas de calor extremas. *El País*, pp. 14–16.
- Ricciardi, P., Teti, L., Maffei, L., & Masullo, M. (2015). Urban soundscapes: Perceptual responses to sound and space. *Journal of Environmental Psychology*, 42, 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2015.03.003>
- Schafer, R. M. (1977). *The tuning of the world*. New York: Knopf.
- Thibaud, J.-P. (2015). *Urban atmospheres*. London: Routledge.
- Torres, M. (2018). *Paisajes sonoros urbanos: percepción, memoria y espacio público* [Tesis doctoral inédita]. Universidad Politécnica de Cataluña.
- World Health Organization. (2018). *Environmental noise guidelines for the European Region*. WHO Regional Office for Europe.

SMILE City

Materiales sostenibles para aplicaciones innovadoras y de bajas emisiones en la ciudad circular

Sustainable Materials for Innovative, Low-Emissions applications in the Circular city

LARA PELAZ PÉREZ/ Fundación del Patrimonio Natural de Castilla y León

JESÚS DÍEZ VÁZQUEZ/ Fundación del Patrimonio Natural de Castilla y León

Palabras clave Keywords

Economía circular, Materiales sostenibles, Innovación arquitectónica, Reciclaje y reutilización, Ciudad baja en emisiones.

Circular economy, Sustainable materials Architectural innovation, Recycling and reuse, Low-emission city.

Resumen

SMILE City es un proyecto de investigación e innovación Horizonte Europa que desarrolla soluciones sistémicas circulares para ciudades mediante el reciclaje de residuos urbanos. El proyecto se centra en tres flujos principales: residuos de construcción y demolición (RCD), neumáticos fuera de uso (NFU) y baterías de vehículos eléctricos al final de su vida útil (BVE-FVU). El proyecto se centra en tres flujos principales: residuos de construcción y demolición (RCD), neumáticos fuera de uso (NFU) y baterías de vehículos eléctricos al final de su vida útil (BVE-FVU). A través de un consorcio de 35 socios de 11 países, SMILE City diseña y valida aproximadamente 100 km de carriles bici integrados con 20 estaciones de recarga para bicicletas eléctricas, construidas con materiales reciclados. Las soluciones incluyen elementos prefabricados de hormigón con áridos reciclados y fibras de acero recuperadas, pavimentos de asfalto modificado con caucho, mobiliario urbano de caucho moldeado, paneles fotovoltaicos con componentes reciclados y sistemas de almacenamiento energético de segunda vida. El proyecto demuestra cómo la circularidad en el sector de la construcción y la movilidad puede reducir emisiones de GEI, crear empleo y mejorar la calidad de vida urbana, alineándose con el Pacto Verde Europeo y la Iniciativa de Ciudades y Regiones Circulares (CCRI).

Abstract

SMILE City is a Horizon Europe research and innovation project developing circular systemic solutions for cities through urban waste recycling. The project focuses on three main waste streams: construction and demolition waste (CDW), end-of-life tyres (ELT), and end-of-life electric vehicle batteries. Through a consortium of 35 partners from 11 countries, SMILE City designs and validates approximately 100 km of cycling paths integrated with 20 e-bike charging stations built with recycled materials. Solutions include precast concrete elements with recycled aggregates and recovered steel fibres, rubberized asphalt pavements, moulded rubber urban furniture, photovoltaic panels with recycled components, and second-life energy storage systems. The project demonstrates how circularity in construction and mobility sectors can reduce GHG emissions, create employment, and improve urban quality of life, aligning with the European Green Deal and the Circular Cities and Regions Initiative (CCRI).

Introducción

Esta década es decisiva para contener el calentamiento global y encaminarse hacia las cero emisiones netas. El reto es complejo, pero también una oportunidad única para catalizar inversión en economía e industria de energías limpias. En este escenario, ciudades y regiones europeas están mejor posicionadas que nunca para impulsar esta transición, convirtiendo los objetivos climáticos en proyectos concretos que generen empleo, crecimiento y cohesión territorial. El marco de la Iniciativa de Ciudades y Regiones Circulares (CCRI) —de la que forman parte Castilla y León— promueve sinergias y difunde conocimiento, lo cual es clave para este impulso. SMILE City es un proyecto Horizonte Europa coordinado por la Asociación Europea de Reciclaje de Neumáticos (ETRA). En Castilla y León, el piloto regional es desarrollado por la Fundación Patrimonio Natural de Castilla y León (FPNCyL), en colaboración con administraciones y socios técnicos.

La transición hacia una economía circular es fundamental para reducir presión sobre los recursos naturales y generar crecimiento y empleo sostenibles, contribuyendo así a la consecución del objetivo de neutralidad climática para 2050 establecido en el Pacto Verde Europeo. Los recursos finitos y los problemas climáticos exigen abandonar el modelo lineal de "tomar-hacer-desechar" y avanzar hacia una economía neutra en carbono, ambientalmente sostenible, libre de tóxicos y completamente circular.

Para lograrlo, es crucial acelerar la bioeconomía europea, considerada parte esencial de esta transición, ya que reconcilia la seguridad alimentaria con el uso sostenible de recursos renovables para fines industriales y la competitividad, garantizando al mismo tiempo la protección del medio ambiente.

En este contexto, las ciudades europeas se enfrentan a desafíos persistentes que condicionan su sostenibilidad. Una parte muy significativa del residuo urbano procede de materiales de construcción, y otra fracción relevante del sector manufacturero, lo que exige soluciones que vayan más allá del reciclaje de bajo valor y prioricen la valorización material de alta calidad. Con este fin, SMILE City concentra sus esfuerzos en tres flujos urbanos críticos: (i) residuos de construcción y demolición (RCD); (ii) neumáticos al final de su vida útil (FVU); y (iii) componentes eléctricos, en particular baterías de vehículos eléctricos FVU y paneles fotovoltaicos. La propuesta es transformarlos en soluciones sistémicas aplicables a la ciudad circular: infraestructura ciclista fabricada con materiales reciclados de altas prestaciones y estaciones de carga para e-bikes eficientes y seguras.

En el caso de los RCD, la generación anual se sitúa en 450–500 Mt, con el hormigón como fracción principal (Eurostat, 2022). Aunque en la UE se recicla en torno al 70%, la mayor parte se destina a aplicaciones de bajo valor como rellenos y zócalos, mientras que cerca del 30% sigue acabando en vertedero. El impacto climático asociado es significativo: los materiales representan entre el 5 y el 12% de las emisiones nacionales de gases de efecto invernadero (GEI), y la prevención de RCD podría evitar hasta el 80% de dichas emisiones (Hertwich, 2020). La valorización de mayor valor añadido (p. ej., la carbonatación o los prefabricados con árido reciclado) se ve frenada por la falta de estandarización, la contaminación de flujos y la competencia del material virgen (European Commission, 2020).

Respecto a los NFU, la presión es global: entre 1.000 y 1.800 millones de neumáticos se desechan anualmente, lo que representa aproximadamente el 2–3% de los residuos mundiales. En la UE solo alrededor del 38% se recicla, mientras que una parte relevante se exporta o valoriza energéticamente en entornos con menor control ambiental. A escala mundial, hasta tres cuartas partes acaban en vertedero, incinerados o abandonados, planteando desafíos técnicos relacionados con fibras y polvo, además de requerir una mejor vigilancia y cumplimiento normativo (European Tyre & Rubber Manufacturers' Association, 2023).

En cuanto a las BVE-FVU, pese a mantener aproximadamente el 80% de su capacidad útil al final de su primera vida, el reciclaje efectivo ronda apenas el 7%, lo que abre una importante oportunidad de segunda vida en aplicaciones de almacenamiento estacionario.

Aquí se inserta el proyecto SMILE City, que propone transformar estos tres tipos de residuos urbanos en soluciones sistémicas circulares para las ciudades europeas. El proyecto reutiliza materiales reciclados procedentes de RCD, NFU, baterías de vehículos eléctricos y paneles fotovoltaicos para desarrollar infraestructura ciclista y estaciones de carga de bicicletas eléctricas, integrando requisitos de seguridad, trazabilidad y armonización regulatoria.

El objetivo final es doble: reducir emisiones de CO₂ mediante el uso significativo de materiales reciclados en productos de mayor valor añadido, y ampliar esa reducción al habilitar movilidad verde con infraestructuras diseñadas para la durabilidad, la mantenibilidad y la trazabilidad.

Objetivos

SMILE City persigue desarrollar y validar un sistema innovador de carriles bici (hasta 100 km) integrados con estaciones de recarga para bicicletas eléctricas, utilizando materiales reciclados procedentes de RCD, NFU, baterías de vehículos eléctricos y paneles fotovoltaicos. Este sistema será validado en 7 países, demostrando su viabilidad técnica, ambiental y económica en contextos urbanos diversos.

Los objetivos específicos incluyen:

1. **Incrementar la circularidad mediante soluciones sistémicas circulares.** El proyecto desarrolla, prueba y valida diferentes aplicaciones tecnológicas innovadoras a partir de residuos de construcción y demolición, neumáticos y residuos eléctricos, aumentando así las cadenas de valor de productos y la valorización eficiente de recursos locales en ciudades y regiones.
2. **Aumentar la eficiencia/independencia de recursos y reducir la huella ambiental negativa.** SMILE City explota y escala tecnologías existentes orientadas a incrementar la eficiencia de recursos de materiales reciclados y reducir la huella ambiental de las prácticas industriales actuales de reciclaje.
3. **Mejorar la información y sensibilización ciudadana e industrial.** Dada la dificultad y falta de concienciación demostrada por las PYMEs y ciudadanos en términos de prácticas circulares, el proyecto demuestra en la práctica los beneficios reales de adoptar comportamientos circulares y simbiosis industrial mediante diversas medidas de difusión, comunicación, explotación y educación.
4. **Validación del modelo de negocio de SMILE City.** Cada proyecto urbano se adapta a un contexto específico con la participación de socios locales en las áreas piloto identificadas. Los carriles bici innovadores se implementan según criterios de sostenibilidad ambiental y de mercado, ajustándose a las especificidades de los sitios considerados y garantizando el cumplimiento con las regulaciones locales, regionales y estatales.
5. **Apoyar la adopción en el mercado de soluciones circulares.** Mediante el acceso a financiación y clusters geográficos, SMILE City aumenta la exposición a inversores corporativos, fomentando el intercambio entre los campos industrial, científico y de inversión, e incorporando la innovación en estrategias nacionales y europeas.

Metodología

SMILE City adopta una metodología multidisciplinar, sistemática e integrada que vincula cadenas de valor materiales (RCD, NFU, baterías/paneles FV) con soluciones de movilidad y una capa digital común. El proyecto incorpora un modelo de eco-contabilidad que permite a administraciones, operadores y ciudadanía monitorear huellas ambientales y traducir los resultados en recomendaciones de política pública.

La ejecución se organiza en un encadenamiento lógico de paquetes de trabajo durante 48 meses. Partimos de la definición de requisitos y diseño/especificación (objetivos funcionales, seguridad, circularidad, contexto regulatorio), continuamos con el desarrollo y prototipado de materiales y estaciones (formulaciones, piezas, arquitectura eléctrica/energética) y pasamos a la implementación piloto en entornos reales. Esta fase se acompaña de ensayo y monitorización para validar desempeño técnico, seguridad y operación. Con la evidencia generada, se realiza la evaluación social y se formulan recomendaciones; finalmente, se prepara la explotación y replicabilidad mediante especificaciones tipo, guías de contratación y paquetes de datos reutilizables.

La toma de decisiones se apoya en Urban Living Labs (ULL) con co-diseño de actores, análisis multicriterio (MCA) para priorizar alternativas y criterios de contratación pública verde que integran desempeño, circularidad y coste. Todas las opciones se justifican con análisis de ciclo de vida (ACV conforme a PEF-OEF) y coste del ciclo de vida (LCCA), incorporando verificación normativa, rutas End-of-Waste y requisitos de certificación cuando proceda. En paralelo, se definen KPIs operativos, ambientales, sociales y económicos.

Como columna vertebral, se despliega una capa digital central e interoperable que integra los datos de ensayo, monitorización y evaluación. Esta capa ofrece APIs abiertas para publicar metadatos y disponibilidad, soporta operación y mantenimiento (paneles en tiempo real), y proporciona trazabilidad mediante Pasaportes Digitales de Producto (DPP) a nivel de activo. El resultado es un ciclo completo que reduce riesgos de implementación, facilita la transferencia entre ciudades/regiones y asegura que cada decisión esté sustentada por evidencia verificable.

Productos y aplicaciones desarrolladas

SMILE City integra diversos materiales reciclados en productos específicos que conforman un sistema coherente de movilidad sostenible:

1. **Asfalto modificado con caucho y polímeros.** Se desarrolla un método para modificar el asfalto con productos reciclados de NFU, permitiendo la construcción económica y sostenible de carriles bici.
2. **Elementos prefabricados de hormigón.** Diseño y producción de elementos de hormigón prefabricado utilizando áridos reciclados obtenidos de RCD y fibras recicladas procedentes de neumáticos fuera de uso en sustitución de barras de acero virgen. Los elementos conforman la estructura de las estaciones de recarga de bicicletas eléctricas.
3. **Mobiliario y separadores moldeados en caucho reciclado.** Bolardos, separadores y pavimentos moldeados en caucho reciclado se emplean para segregar, proteger y pacificar el tráfico ciclista, combinando amortiguación de impactos, modularidad y fácil mantenimiento.
4. **Estaciones innovadoras de recarga de bicicletas eléctricas.** Incorporan paneles fotovoltaicos fabricados con materiales reciclados y sistemas de almacenamiento con baterías de segunda vida procedentes de vehículos eléctricos.

Impactos esperados

Impactos ambientales

- **Transición hacia la economía circular.** SMILE City aborda cuestiones como los residuos de construcción, materiales reciclados, residuos eléctricos y baterías de VE, con el objetivo de reducir el impacto ambiental asociado con la eliminación de residuos. Esta transición se alinea con los objetivos ambientales de la Unión Europea, particularmente los establecidos en el Pacto Verde Europeo y el Plan de Acción para la Economía Circular, enfocándose en estimular el desarrollo de mercados líderes para productos climáticamente neutros y circulares, apoyar el diseño circular de productos y priorizar la reducción y reutilización de materiales antes del reciclaje.
- **Eficiencia de recursos.** Al incorporar materiales reciclados en el desarrollo de carriles bici y estaciones de recarga de bicicletas eléctricas, el proyecto contribuye directamente a reducir la demanda general de materias primas y, en consecuencia, reduce la carga ambiental asociada con la extracción y la producción de recursos. Este enfoque se alinea con los principios establecidos en la Directiva Marco de Residuos (2008/98/EC) y las estrategias de economía circular.
- **Reducción de emisiones de carbono.** Mediante la reutilización de materiales y la promoción de la movilidad verde, el proyecto reduce la intensidad de GEI frente a alternativas convencionales. En hormigón con áridos reciclados, acero secundario y caucho reciclado, la bibliografía reporta ventajas claras; en las estaciones de carga, la integración fotovoltaica y el uso de baterías de segunda vida disminuyen la huella operativa frente a configuraciones de referencia.

Impactos sociales

- **Creación de empleo.** La implementación de los pilotos estimulará la construcción y el desarrollo de infraestructuras, proporcionando oportunidades para empresas constructoras, contratistas y trabajadores cualificados. El uso de materiales de construcción reciclados promueve el crecimiento de empresas especializadas en reciclaje y reutilización de materiales, generando oportunidades de empleo en gestión de residuos, recuperación de materiales y prácticas de economía circular. Oportunidades similares de empleo surgirán en negocios relacionados con la fabricación de paneles fotovoltaicos, reacondicionamiento de baterías, venta minorista de bicicletas eléctricas y sectores de servicios.
- **Participación ciudadana.** Se evaluará el impacto social del proyecto. El plan de trabajo de SMILE City incluye la selección de indicadores sociales para cuantificar los impactos de la solución y el desarrollo de recomendaciones políticas mediante el compromiso con las partes interesadas, administradores locales y ciudadanos. Al desarrollar infraestructura ciclista y estaciones de recarga, el proyecto aumenta la conveniencia y accesibilidad de bicicletas y bicicletas eléctricas, facilitando que los ciudadanos adopten prácticas de transporte climáticamente neutras.
- **Eco-contabilidad.** SMILE City también planea establecer un método de eco-contabilidad que abarca eco-costes, eco-créditos, eco-incentivos y eco-cuentas individuales, permitiendo a las partes interesadas rastrear sus huellas ecológicas diarias con eco-costes y eco-créditos.

Impactos económicos

- **Adopción en el mercado de soluciones circulares.** Fomenta la colaboración entre los sectores industrial, científico y de inversión, promoviendo la innovación y la creación de empleo en línea con las estrategias de la UE. El uso por parte de SMILE City de materiales reciclados y

prácticas sostenibles se alinea con el Reglamento de Finanzas Sostenibles y Taxonomía de la UE (2020/852/UE), que clasifica las actividades económicas ambientalmente sostenibles.

- **Modelos de negocio e IPR.** El desarrollo de modelos de negocio y la utilización efectiva de los derechos de propiedad intelectual (IPR) reflejan un compromiso con la creación de valor económico.

Conclusiones

SMILE City demuestra que la construcción circular es una oportunidad para transformar las ciudades en entornos sostenibles. La combinación de investigación, innovación y participación ciudadana permite avanzar hacia un futuro urbano de bajas emisiones, resiliente y justo.

El proyecto representa un modelo replicable de cómo integrar múltiples flujos de residuos urbanos en soluciones sistémicas coherentes que no solo son técnicamente viables, sino también ambientalmente beneficiosas y económicamente atractivas. La validación del sistema en 7 países con diferentes contextos urbanos, climáticos y regulatorios proporciona una base sólida para la replicabilidad y escalabilidad de las soluciones desarrolladas en toda Europa y más allá.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido financiado por la Unión Europea a través del programa Horizonte Europa bajo el acuerdo de subvención número 101135406, dentro de la convocatoria HORIZON-CL6-2023-CIRCBIO-02. Los autores agradecen a todos los socios del consorcio SMILE City por su dedicación y contribuciones al desarrollo de soluciones innovadoras para ciudades circulares.

Referencias

European Tyre & Rubber Manufacturers' Association. (2023). *End-of-life tyres management—Statistics and trends*.

European Commission. (2020). *A new Circular Economy Action Plan—For a cleaner and more competitive Europe (COM(2020) 98 final)*. (P. O. Union, Ed.) Recuperado el noviembre de 2025, de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52020DC0098>

Eurostat. (2022). *Generation of waste by waste category*. Recuperado el noviembre de 2025, de https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wasgen/default/table?lang=en

Hertwich, E. G. (2020). *Resource Efficiency and Climate Change: Material efficiency strategies for a low-carbon future*. United Nations Environment Programme, International Resource Panel.

El caso de la Escuela de Arquitectura de Talca en Chile

The case of the Talca School of Architecture in Chile

JAVIER ALEJO HERNÁNDEZ-AYLLÓN / Universidad de Valladolid

SUSANA CONSTANZA SEPÚLVEDA-GENERAL/ Universidad de Talca

Palabras clave Keywords

Material, contexto, ubiestesias, proyectar, Escuela de Arquitectura de la Universidad de Talca

Material, context, ubi-aesthetics, To design, Talca School of Architecture

Resumen

La arquitectura es el 'doble' de teoría y práctica donde la percepción de esta se imbrica en las ubiestesias, en la experiencia vivida que cada agente percibe. El material entendido como fonema de una sintaxis construida, es el elemento principal que formaliza cada solución constructiva que nos habla de un lugar, nos sitúa en un contexto no solo territorial, sino social en ese mantenerse despierto por el que los tiempos presentes abogan.

Un caso de estudio es el de la Escuela de Arquitectura de Talca en Chile. Escuela donde sus alumnos aprenden desde el primer curso a sentir y percibir los materiales en su esencia y, a como disponerlos para que hablen no sólo entre sí, sino también con el contexto al que responden. Los materiales en su potencia formalizan un acto que reflexiona sobre el papel que los mismos juegan en su hablar si sabemos escucharlos, independientemente de la naturaleza de estos, sino en su propia esencia, donde la espacialidad transita tras el propio material.

Abstract

Architecture is the 'double' of theory and practice where the perception of the latter is imbricated in the ubi-aesthetics, in the lived experience that each agent perceives. Material, understood as the phoneme of a constructed syntax, is the main element that formalizes each constructive solution that speaks to us of a place, situates us in a context not only territorial, but social in that 'woke' for which the present times advocate.

A case study is that of the School of Architecture of Talca in Chile. A school where students learn from the very first course to feel and perceive materials in their essence and how to arrange them so that they speak not only among themselves, but also with the context they respond to. The materials in their potential formalize an act that reflects on the role they play in their speaking if we know how to listen to them, regardless of their nature, but in their very essence, where spatiality transits behind the material itself.

Introito. La arquitectura respuesta a las ubiestesias

En el Libro II de la Física de Aristóteles se define la causa eficiente como el principio a partir del cual proviene el cambio [movimiento] o el reposo, como (...) es también causa el padre respecto de su hijo, y en general el que hace algo respecto de lo hecho, y lo que hace cambiar algo respecto de lo cambiado.

Desde los orígenes del pensamiento Occidental, el hombre ha manifestado su afán por remediar los poderes semovientes de la *physis* a través de la *tekne*, y para ello ha construido máquinas, crecientemente complejas, capaces de poner su energía brutal al servicio humano, transformando no sólo la tecnología, sino también la cultura, la forma, el sujeto y el medio. De ahí que la máquina haya ahondado sobre la arquitectura, transformándola y volviendo a la misma, malogradamente, dependiente de la energía capaz de accionar a estas complejas máquinas.

En el tiempo actual, visto desde la perspectiva del *chronos*, acuciado por la crisis energética, el calentamiento global y, como consecuencia el cambio climático, debemos entender la arquitectura como una disciplina que tiene el compromiso de contribuir a mitigar estas situaciones. Bajo este prisma nos vamos a reflexionar sobre una suerte de ideas preconcebidas, a modo de verdades universales, sobre qué es arquitectura. Por ejemplo, Wikipedia nos define la arquitectura como: «el arte y la técnica de proyectar, diseñar y construir, modificando el hábitat humano, estudiando la estética, el buen uso y la función de los espacios, ya sean arquitectónicos, urbanos o de paisaje». Si nos retrotraemos, a quizá una de las primeras definiciones argumentadas sobre qué es arquitectura, es decir, a Vitruvio (h. 15 a.C.) se nos presenta a la arquitectura como: «una ciencia que surge de muchas otras ciencias, y adornada como muy variado aprendizaje; por la ayuda de que un juicio se forma de esos trabajos que son el resultado de otras artes. La práctica y la teoría son sus padres. La práctica es la contemplación frecuente del modo de ejecutar algún trabajo dado, o de la operación mera de las manos, para la conservación de la materia de la mejor forma y de la manera más acabada. La teoría es el resultado de ese razonamiento que demuestra y explica que el material forjado ha sido convertido para resultar con el fin propuesto. El arquitecto meramente práctico no es capaz de asignar las razones suficientes para las formas que él adopta, y el arquitecto de teoría falla también, agarrando la sombra en vez de la substancia. El que es teórico, así como práctico, por lo tanto, construye doblemente; capaz no sólo de probar la convivencia de su diseño; sino igualmente llevarlo a su ejecución».

Reflexionemos, entonces, sobre esta idea de ciencia que surge de otras muchas ciencias, donde la teoría y la práctica son sus padres. Una práctica que nace desde la contemplación, una suerte de operación en la que la percepción juega un rol fundamental, la pregunta sobre la que el presente texto se asienta es justamente esa reflexión, esa inquietud y asombro por escuchar y percibir lo que la arquitectura, asentada en un determinado contexto, tiene que ofrecernos. Lógicamente, nos estamos adentrando en el terreno de la subjetividad trascendental. Subjetividad que nos muestra las ubiestesias como las sensaciones localizadas en el cuerpo vivido, ese «ser a la mano» (Heidegger, 1927), ese modo en que los objetos se nos presentan a través del uso práctico y la interacción, en oposición y contraste con el mero «estar ante los ojos». Entonces nos cabe ahora preguntarnos sobre si esta idea de «ser a la mano» forma parte de la formación académica que recibe un estudiante de arquitectura y en qué manera se materializa la misma, cuando estamos en un momento de cambio, no sólo derivado de la situación energética global, sino en cómo abordamos este 'mantenerse despierto' woke, ante los problemas de desigualdad racial e inclusión. Es decir, el presente texto busca cual sería, si es habría cabida, el eslogan, cual Academia de Platón «que no entre nadie ignorante en geometría», que presidiría una Escuela de Arquitectura.

Lo que el texto nos presenta es el caso de estudio de una pequeña y reciente Escuela de Arquitectura situada en el Valle Central de Chile. Escuela en que su esencia se basa en dos férreos soportes, escuchar el lugar y tocar el material. En este doble «yo soy yo y mis circunstancias» que parafraseando a Ortega podríamos extrapolar al arte y ciencia de lo que es la arquitectura.

El sonido del material posibilidad de intervención – Estado de la cuestión -

La arquitectura como ciencia es una disciplina viva en un continuo transitar. Un fluir por diferentes meandros que deben solventarse a las necesidades sociales, culturales, energéticas y constructivas que marcan cada época en una suerte de posibilidades que hay que saber escuchar (fig. 01).



Figura 1. César Manrique ante una posibilidad de habitar. Fuente: Congreso sobre arquitectura de 1994 y la figura de César Manrique

Me encontré con cinco burbujas volcánicas donde mi asombro colmó mi imaginación [...]. Allí mismo, en su interior, supe que podría convertirlas en habitáculos para la vida del hombre, empezando a planificar mi futura casa viendo con enorme claridad su magia, su poesía y al mismo tiempo su funcionalidad. Al salir de nuevo de su intimidad y de su gran silencio tuve que hacer un esfuerzo para Volver a una realidad que se me había escapado. (Manrique. C, 1991).

El Material como herramienta de diálogo propositivo

La arquitectura, en su *telos* puede ser entendida como una construcción erguida con un propósito. La reflexión viene dada sobre la posibilidad de tener sus propias 'formas simbólicas' y la dependencia entre lo tangible y éstas.

La arquitectura nos habla no con una sintaxis repleta de fonemas, palabras o textos, pero si lo percibimos con un vocabulario específico conformado por una serie de fonemas que son los materiales, combinados en una singular gramática que crean elementos nos ofrecen una sintaxis materializada en sistemas constructivos que marcan la imagen que escuchamos, vemos, tocamos, olemos y hasta saboreamos que es esa suerte de realidad construida.

El diálogo que la sociedad actual demanda es el del aprovechamiento no sólo de los medios que disponemos sino en el análisis de la vida útil de estos singulares fonemas que son los materiales. Recurriendo nuevamente a Heidegger y su «ser a la mano» nos detendremos en **Reconstruir**, **Rehabilitar** y **Repensar**, esta triple R que marca no sólo lo tangible de un material, sino que da especial valor a lo intangible del mismo (fig. 02).



Figura 2. Izq. Pabellón Organic Growth de Izaskun Chinchilla en Manhattan 2015; der. Lost Forest de Juan Ruiz-Cabello & Santiago del Águila en Donostia 2023. Fuente: Web de Izaskun Chinchilla y Festival TAC

Los ejemplos mostrados atienden a esa triple R, el aprovechamiento de paraguas, ruedas de bicicleta y neumáticos, en el caso del Pabellón Organic Growth, confiere esa suerte de diálogo entre el entorno natural y un nuevo entorno temporal, donde el sonido del material es la esencia de la intervención. Mientras que en el caso del Lost Forest se profundiza también en los ausentes como posibilidad, se narra la tradición del transporte de trocos y su apilamiento para un futuro posible, lo 'mágico' en este caso es en que el apilamiento del propio material crea un refugio, un nuevo entorno temporal que dota al lugar de una nueva identidad.

Si bien estos ejemplos abordan esa triple R, volviendo a la reflexión sobre que lema figuraría en la puerta de las escuelas de arquitectura, cual Academia de Platón se tratase, nos encontramos con una respuesta vacía, carente de significado, donde la gran mayoría de nuestras escuelas de arquitectura se rigen más por un sinfín de trámites burocráticos que por una esencia propia que ofrezca la percepción sobre la materia convertida en material como una herramienta propositiva, aunque es cierto que no debemos generalizar ya que cada Escuela cuenta con su identidad propia.

La materialidad es elección de la lectura que el proyectista hace del lugar, y aunque esta debería ser su realidad, nosotros conocemos los llamados 'edificios cebra'. Un intento de globalización y respuesta tanto constructiva como formal de un edificio que carece de raíz con su entorno; además, su materialidad no permite ese aprovechamiento de la triple R, sino que se erigen como si fueran infinitos, impasibles al paso del tiempo y de las necesidades que la sociedad requiere en cada espacio temporal. De ahí la necesidad de mostrar las bondades de todas aquellas escuelas, intervenciones o proyectos en los que se sepa escuchar a la materia convertida en material como es el caso que forma el cuerpo del presente texto.

El caso de la Escuela de Arquitectura de Talca – Metodología -

Una vez expuesto el contenedor que cobija la problemática del presente texto, nos adentramos en analizar la filosofía de la Escuela de Arquitectura de Talca en Chile a través de tres casos de estudio realizados como proyectos de título por tres arquitectos que entendieron ese doble que es la arquitectura: teoría y práctica.

La esencia de la Escuela de Arquitectura de Talca

Cuando el siglo pasado contaba sus días para el cambio no sólo de siglo sino de milenio surgía en una ciudad del Valle Central de Chile, en la Región del Maule, en la ciudad de Talca una interesante Escuela de Arquitectura que en sus poco más de 25 años de existencia ha sido capaz de crear una marca y filosofía propia que parece heredada de la descripción que Vitruvio nos narraba sobre lo que es la Arquitectura.

Talca es una ciudad de paso entre el norte y sur de Chile, de unos 250.000 habitantes que se basa en el sector primario como fuente principal de sustento económico, sin grandes industrias, sin grandes infraestructuras y sin grandes pretensiones, más allá de reconocer con orgullo sus raíces de las que brota un sentir arraigado a su territorio. Aunque la Escuela de Arquitectura de Talca nace en 1999, y como se describe a continuación con una significancia muy clara, hay un dato que condiciona más, si cabe, su propia esencia. Se trata del gran terremoto que sucedió en el 2010, que dejó una huella destrucción en la ciudad que se trasladó al carácter de sus habitantes. Motivo por el que actuaciones como las desarrolladas desde la Escuela de Arquitectura son recibidas como un signo de esperanza, de un nuevo resurgir, de esa triple R que tanto dialoga con lo que un material debe significar.

Pero vamos a retornar a la impronta de la Escuela de Arquitectura de Talca. En el curso académico del 2000 se define el contenido del Taller de Arquitectura, donde la base es la mano, el material más que un trabajo espacial; o expresado de otra manera, se concibe la espacialidad como resultado de un material. Desde un primer momento, la Escuela, busca el diálogo que diferentes perfiles tanto nacionales como internacionales puedan ofrecer a los alumnos sobre la importancia del material. Se busca ese saber escuchar – escuchar la materia, ir a lo primigenio y descubrir lo que un material puede ofrecer y determinar cuál es su posibilidad en una intervención. El curso académico se subdivide en 4 bimestres lo que permite estructurar cada período como una intervención propia.

Esta organización se vio reforzada en el 2001 con la creación del proyecto 'Ciudad Valle Central', donde la Escuela se compromete a que los alumnos realicen intervenciones sobre el territorio del Valle Central de Chile, no sólo de manera formal y material, sino social como una suerte de intercambio y aprendizaje que enriquece a los alumnos con el territorio y sus posibilidades. Derivado de esta adhesión se configuran en el programa educativo tres talleres (fig. 03-05):

- Taller de materia: Donde los alumnos de primer curso se familiarizan con la materia que convertida en material explora sobre lo existente y propio de la zona. Los materiales se tocan, se aprende a escucharlos y hasta a transórmalos, donde, por ejemplo, la existencia de un taller de herramientas con hornos de cocción juega un rol fundamental en el desarrollo y construcción de un conocimiento empírico, palpable en cada alumno.



Figura 3. TALLER DE MATERIA profesor: Arq: Juan Román. Fuente: WEB de la Universidad de Talca.

- **Taller de agosto:** Los alumnos de segundo a quinto curso agrupados de manera transversal y no por cursos afrontan el reto de desarrollar una intervención en una zona del Valle Central en un período de cuatro semanas en las que se diseña, gestiona y construye una pequeña pero significativa intervención para zonas y lugares donde la arquitectura no parece llegar, donde con gestos mínimos se aborda la necesidad de una comunidad. Muchas veces, son los propios vecinos de los lugares donde se formalizan las intervenciones quienes acogen en sus casas a los alumnos y los ayudan facilitándolos, no sólo víveres, sino materiales, su tiempo y sus manos. Este taller es una suerte de preámbulo colectivo, una práctica que logra en sus cinco iteraciones dentro de la formación del estudiante constituir una antesala al taller de Título.



Figura 4. TALLER DE AGOSTO colectivo profesores Escuela de Arquitectura. Plaza en los Álamos (2014), Mirador ¼ de camión (2017) y Estancia en el Cartón (2023). Elaboración propia.

- **Taller de Título:** Los alumnos que desean finalizar sus estudios son guiados por un tutor y a través de la obra demuestran sus capacidades para materializar una intervención que aporte algo al lugar donde intervengan. El reto aquí radica en que el alumno debe buscar una contraparte, gestionar la financiación con la contraparte o con ella ir a buscar el financiamiento público representado en dinero o materiales con los que construir, diseñar y desarrollar un proyecto, para finalizar con la materialización de ese sueño para la comunidad. A la fecha la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Talca cuenta con más de 1000 obras en su mayoría situadas en los territorios de la Región del Maule.



Figura 5. OBRA DE TÍTULO izq. superior: Torre La Villa, Obra de Título de Diego Herrera (2019) tutora Arq. Susana Sepúlveda, der. superior: ProtoPET, Obra de Título de Ricardo Vásquez (2017) tutora: Arq. Susana Sepúlveda; izq. y der. inferior Oratorio de la Peregrina, Obra de título de Sebastián Mejías (2019) tutor: Arq. Eduardo Aguirre. Fuente: Repositorio de imágenes Escuela de Arquitectura- Universidad de Talca.

La realidad del sonido del material en la Escuela de Arquitectura de Talca

Aunque todos los talleres derivan de la esencia del propio material, es el desarrollo de las obras de título aquel en el que la potencia de material se convierte en acto sin perder su esencia. A continuación, se muestran cuatro trabajos (fig. 6) que ejemplifican esta esencia:

Cubierta en el Parrón.

Autor Tutor	Cristian Quezada Susana Sepúlveda
Año	2020
Contexto	La escuela rural de la localidad de El Parrón – comuna de Curicó es la contraparte de esta propuesta, donde el alumno observa que utilizar el patio se convierte en un desafío lineal en una escasa masa de árboles en uno de los perímetros.
Ideación	Dotar a la Escuela de El parrón de una cubierta que permitiera conseguir una sombra tamizada que unida a la cancha del establecimiento pudiese generar un nuevo espacio para el esparcimiento de los niños.
Materialidad	Varas de álamo de un bosque aledaño y madera reciclada.



Soporte para el precalentamiento Club Deportivo San Gerardo.

Autor Tutor	Felipe Llanos Susana Sepúlveda
Año	2021
Contexto	El alumno socio y jugador activo del Club Deportivo San Gerardo de la comuna de Río Claro es consciente de la carencia de un espacio para el precalentamiento para los deportistas. La necesidad surge del uso rotativo de las canchas de fútbol rural donde es frecuente tener jornadas largas y varios encuentros en una misma fecha.
Ideación	Dotar al Club Deportivo San Gerardo de un espacio para el precalentamiento de futbolistas en el contexto del desarrollo de encuentros en el fútbol rural.
Materialidad	Neumáticos reciclados y postes de luz reciclados.



Plaza Embarcadero.

Autor Tutor	Felipe Ríos Susana Sepúlveda
Año	2024
Contexto	Tras las inundaciones sin precedentes en Chile el año 2023, la ciudad de San Javier de Loncomilla pierde parte de su parque Fluvial que integraba una llegada al agua para el club de canotistas y su frente al río.
Ideación	Se busca enlazar desde el redescubrimiento del parque fluvial arrasado una llegada al río que sirva de soporte para la actividad deportiva y a la vez otorgue a la comunidad una manera de acercarse nuevamente a las aguas del Río Loncomilla con un muelle adaptable a las crecidas y desmontable.
Materialidad	Bidones reciclados, acero y madera.



Estar en la pared de Armerillo.

Autor Tutor	Sofía Tarud Juan Román
Año	2024
Contexto	La propuesta responde a cómo generar un espacio de acogida y descanso para los escaladores que ascienden y descienden por la denominada pared de Armerillo ubicada en la localidad del mismo nombre en San Clemente. La zona de escalada limita con una carretera con tráfico moderado – denso lo que imposibilita a los escaladores mantenerse en un lugar seguro para su visualización. Asimismo, al otro lado de la carretera existe un gran talud y pendiente accidentada.
Ideación	Se trata de generar un espacio de acogida y descanso frente a la pared del Armerillo con los recursos de que se dispongan
Materialidad	La empresa encargada del mantenimiento y conservación de esa carretera y varias infraestructuras urbanas cede a la alumna una serie de guardarraíles o biondas de 4,30 m de longitud. Las biondas se encuentran agujereadas para su sujeción con una separación de 2,00



Figura 6. OBRAS DE TÍTULO de Cristian Quezada; Felipe Llanos; Felipe Ríos y Sofía Tarud. Fuente: Elaboración propia y repositorio de imágenes Escuela de Arquitectura - Universidad de Talca.

El sonido del material

El material como fonema de la arquitectura nos habla, nos transmite y permite su percepción a través de su propia experiencia. La arquitectura no sólo dialoga con los presentes sino también con los ausentes, tanto pasados como futuros y, es en esta percepción donde se genera ese doble teórico y práctico que narraba Vitruvio. El «ser a la mano» del que nos habla Heidegger encuentra en la Escuela de Arquitectura de Talca su significado. Sus alumnos durante su formación se comunican con el material que encuentra en su entorno y con el mismo territorio soporte. El material encuentra una suerte de segunda vida en las manos de estos alumnos lo que nutre a los mismos de una experiencia que quedará en su imaginario y por lo tanto será parte de ellos mismos en su futuro profesional. Es decir, si sabemos escuchar al material seremos capaces de generar esa gramática y suerte de disciplinas que es la arquitectura, una arquitectura responsable con el tiempo actual.

Agradecimientos

La Escuela de Arquitectura de la Universidad de Talca y a los autores de las obras expuestas en este texto.

Referencias

Chinchilla, I. (2015). *Pabellón Organic Growth* [6 de diciembre de 2025]. Recuperado de: <https://izaskunchinchilla.es/inicio/>

Escuela de Arquitectura de Talca. (2025). *Repositorio de obras de Título*. [15 de julio de 2025]. Recuperado de: <https://www.obrasdetitulo.cl/project>

Heidegger, M. (1927). *Ser y tiempo*. Lugar de edición: Madrid (2018). Editorial: Trotta

TAC. (2023). *Lost Forest* [en línea]. [6 de diciembre de 2025]. Recuperado de: <https://tacfestival.com/donostiasansebastian/>

Vitruvio, M. (27-23 a.C.). *Los diez Libros de Arquitectura*. Lugar de edición: Madrid (1997). Editorial. Iberia

CO-NET. Reutilizar para habitar.

CO-NET. From nets to nesting.

LAURA DEL PINO NORIEGA/ Kean University

Palabras clave Keywords

Construcción circular, *design-build*, arquitectura vernacular, pedagogía intercultural, reutilización de residuos.

Circular construction, design-build, vernacular architecture, intercultural pedagogy, waste reuse.

Resumen

Este artículo presenta CO-NET, una iniciativa internacional de *design-build* que reunió a más de cuarenta estudiantes y docentes de Estados Unidos y China para diseñar y construir de forma colaborativa una serie de estructuras experimentales en Dongtou, una isla próxima a Wenzhou conocida por su tradición pesquera, su artesanía cerámica y sus paisajes intermareales. Concebido como un experimento tanto pedagógico como material, el proyecto se desarrolló a lo largo de cuatro meses de colaboración remota, seguidos de una fase intensiva de construcción in situ.

CO-NET exploró el potencial arquitectónico de materiales de desecho obtenidos localmente —redes y cuerdas de pesca abandonadas, residuos de construcción y demolición, andamios metálicos obsoletos y plásticos descartados—, reinterpretándolos como agentes activos del diseño y no como simples subproductos. Como plataforma pedagógica, CO-NET puso el énfasis en la sostenibilidad, los principios de la economía circular y el intercambio intercultural, fomentando una reflexión crítica sobre la ética material, la colaboración y las prácticas constructivas situadas. El artículo analiza las estrategias estructurales, los métodos colaborativos y el marco educativo del proyecto, proponiendo CO-NET como un modelo para una pedagogía arquitectónica contemporánea basada en la agencia material, la construcción colectiva y el diseño ambientalmente situado.

Abstract

This paper presents **CO-NET**, an international *Design-Build* initiative that brought together over forty students and faculty from the United States and China to collaboratively design and construct a series of experimental structures on Dongtou, an island near Wenzhou known for its fishing industry, ceramic craftsmanship, and dynamic tidal landscapes. Conceived as both a pedagogical and material experiment, the project unfolded through a four-month phase of remote collaboration, followed by an intensive on-site construction workshop.

CO-NET explored the architectural potential of locally sourced waste materials—including discarded fishing nets and ropes, construction and demolition debris, obsolete metal scaffolding, and plastic waste—reframing them as active design agents rather than residual by-products. Functioning as a pedagogical platform, CO-NET emphasized sustainability, circular design principles, and intercultural exchange, encouraging students to engage critically with material ethics, collaboration, and site-specific construction practices. This paper reflects on the project's structural strategies, collaborative processes, and educational framework, positioning CO-NET as a model for architecture pedagogy that foregrounds material agency, collective making, and environmentally situated design in the context of contemporary architectural education.

De redes a refugios

En enero de 2025 desarrollamos el proyecto CO-NET en la isla de Dongtou, frente a la costa de Wenzhou, como parte de un programa académico internacional de *design-build*. El trabajo se llevó a cabo mediante una combinación de coordinación remota previa y una fase intensiva de construcción en el lugar, lo que permitió trasladar decisiones proyectuales al contacto directo con el territorio, los materiales disponibles y las condiciones ambientales del contexto costero. Desde el inicio, el proyecto se planteó como una experiencia de aprendizaje basada en la acción, en la que el diseño no se entendía como una fase previa y cerrada, sino como un proceso abierto que evolucionaba durante la construcción.

CO-NET funcionó como una plataforma pedagógica y cultural orientada a examinar la relación entre arquitectura, territorio y ciclos materiales. Frente a modelos de enseñanza centrados en la representación o la simulación, el proyecto propuso una práctica situada, colaborativa y materialmente consciente, capaz de integrar conocimientos vernaculares, experimentación estructural y reflexión crítica sobre la sostenibilidad. El uso de materiales recuperados procedentes de actividades pesqueras, residuos de construcción y desechos plásticos no fue una decisión instrumental, sino un posicionamiento ético y metodológico que condicionó tanto el proceso de diseño como las soluciones espaciales y constructivas adoptadas.

La elección de Dongtou como emplazamiento respondía a estas intenciones. Históricamente vinculada a la pesca, la cerámica y las infraestructuras litorales, la isla presenta un paisaje híbrido donde los restos de sistemas productivos conviven con ecosistemas frágiles, como marismas y zonas intermareales. Este contexto, atravesado por procesos simultáneos de uso, abandono y transformación, ofrecía un marco especialmente fértil para explorar enfoques de construcción circular y pedagogías arquitectónicas ancladas en el lugar.



Figura 1. Vista aérea del pabellón en el entorno. Wenzhou-Kean University.

Contexto territorial y cultural: Dongtou como laboratorio material

Dongtou es un archipiélago compuesto por pequeñas islas y penínsulas artificiales, moldeadas tanto por procesos naturales como por décadas de intervención humana. La economía local ha estado tradicionalmente ligada a la pesca, actividad que ha generado una cultura material específica basada en el uso de redes, cuerdas, boyas y sistemas de amarre. Sin embargo, los cambios en los métodos de pesca, la industrialización y la regulación de las actividades marítimas han generado una acumulación progresiva de materiales obsoletos a lo largo de la costa.

Estos residuos —redes de nylon desgastadas, cabos de distintos diámetros, estructuras metálicas abandonadas— constituyen una huella física de transformaciones económicas y tecnológicas recientes.

En lugar de ser eliminados o invisibilizados, CO-NET los incorpora como materia prima del proyecto, reconociendo en ellos un potencial estructural, espacial y simbólico. La arquitectura se convierte así en un medio para hacer visibles estos flujos materiales y para reinsertarlos en un nuevo ciclo de uso.

Además de su dimensión material, Dongtou posee una fuerte identidad cultural asociada a la artesanía local. Técnicas como el remiendo de redes o el trenzado de cuerdas forman parte de un conocimiento transmitido de generación en generación, estrechamente ligado a las condiciones ambientales del lugar. Integrar estas prácticas en el proceso de diseño no implicó una reproducción literal de formas tradicionales, sino una reinterpretación contemporánea de sus lógicas constructivas y estructurales.

Del diseño remoto a la construcción in situ: colaboración y ensamblajes materiales

El desarrollo de CO-NET se inició en septiembre de 2024 con una fase prolongada de trabajo remoto que se extendió durante cuatro meses y que resultó fundamental para establecer las bases conceptuales, materiales y metodológicas del proyecto. Durante este periodo, los estudiantes, distribuidos entre distintas instituciones y husos horarios, llevaron a cabo una investigación colectiva sobre el contexto físico, cultural y productivo de Dongtou. Este trabajo incluyó el análisis de técnicas de construcción locales, entrevistas informales con los habitantes, cartografías territoriales y estudios preliminares de los materiales disponibles, prestando especial atención a los residuos generados por las actividades pesqueras y constructivas de la isla. Lejos de funcionar como una fase meramente preparatoria, esta etapa permitió construir un marco compartido de referencias y criterios que orientó las decisiones proyectuales posteriores.

Las sesiones semanales en línea se estructuraron como talleres críticos de intercambio y debate, en los que se presentaban avances, se contrastaban hipótesis y se ajustaban progresivamente las estrategias de diseño. La distancia geográfica, lejos de constituir una limitación, favoreció una dinámica de trabajo intensamente mediada por herramientas de representación. El dibujo, los diagramas, los modelos digitales y las secuencias constructivas esquematizadas se convirtieron en instrumentos clave para traducir ideas espaciales en sistemas constructivos viables, anticipando los problemas que surgirían durante la fase de montaje.

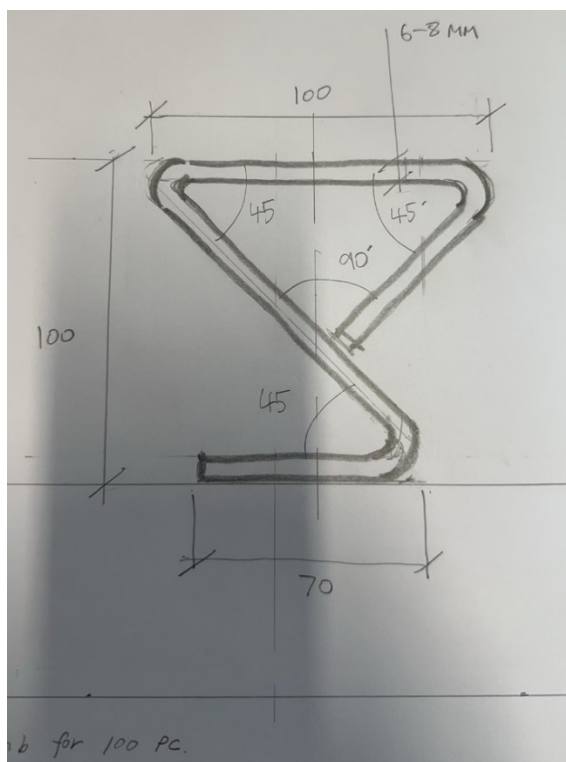


Figura 2. Boceto del detalle de los conectores en los arcos estructurales.

La transición al trabajo in situ tuvo lugar en enero de 2025, durante un taller intensivo de una semana en Dongtou. Este cambio de escala —del espacio virtual al contacto directo con el territorio— supuso un punto de inflexión en el proceso. Con el apoyo logístico del gobierno local, el equipo tuvo acceso tanto a materiales recuperados como a infraestructuras básicas para la construcción, lo que permitió confrontar

las propuestas desarrolladas en remoto con las condiciones reales del lugar. Las decisiones de diseño pasaron entonces a estar determinadas por factores como el peso, la flexibilidad, el estado de conservación y la disponibilidad inmediata de los materiales, así como por las condiciones climáticas y topográficas del entorno costero.



Figura 3. Detalle de las maromas que conectan los arcos estructurales.

En este contexto, el residuo se consolidó como el principal medio de diseño. Las redes de pesca abandonadas se emplearon no solo como elementos de cerramiento o protección solar, sino como componentes estructurales capaces de trabajar a tracción y de definir espacialidades permeables. Las cuerdas, de diferentes diámetros y procedencias, funcionaron como sistemas de atado, tensado y arriostamiento, permitiendo ensamblajes ajustables y fácilmente modificables durante el proceso constructivo. Del mismo modo, los restos de obra y la piedra local se utilizaron como contrapesos, anclando las estructuras al terreno sin recurrir a cimentaciones permanentes y reforzando el carácter reversible de la intervención.

La incorporación de residuos plásticos, como botellas desechadas, dio lugar a pequeñas instalaciones escultóricas integradas en el conjunto, que funcionaban como jardines experimentales o hitos dentro del recorrido. Estos elementos introducían una dimensión sensorial y cromática que contrastaba con la aspereza de los materiales principales, ampliando la experiencia espacial y subrayando la heterogeneidad material del proyecto. En conjunto, la articulación entre colaboración remota, construcción in situ y ensamblajes con materiales recuperados permitió que CO-NET se desarrollara

como un proceso abierto y adaptativo, en el que diseño y construcción se retroalimentaron continuamente.

Estrategias estructurales: entre la arquitectura local y el cálculo estructural

El sistema estructural desarrollado en CO-NET se articuló en torno a una serie de arcos ligeros cuya geometría y lógica constructiva tomaban como referencia las trampas de pesca tradicionales utilizadas en la región. Estas estructuras, habitualmente concebidas para trabajar en condiciones cambiantes de marea, corriente y viento, ofrecían un modelo empírico de estabilidad basado en la combinación de flexibilidad y resistencia. La reinterpretación arquitectónica de estas tipologías permitió trasladar principios propios de la cultura material local a un sistema constructivo contemporáneo, capaz de responder a las exigencias ambientales del contexto costero de Dongtou.

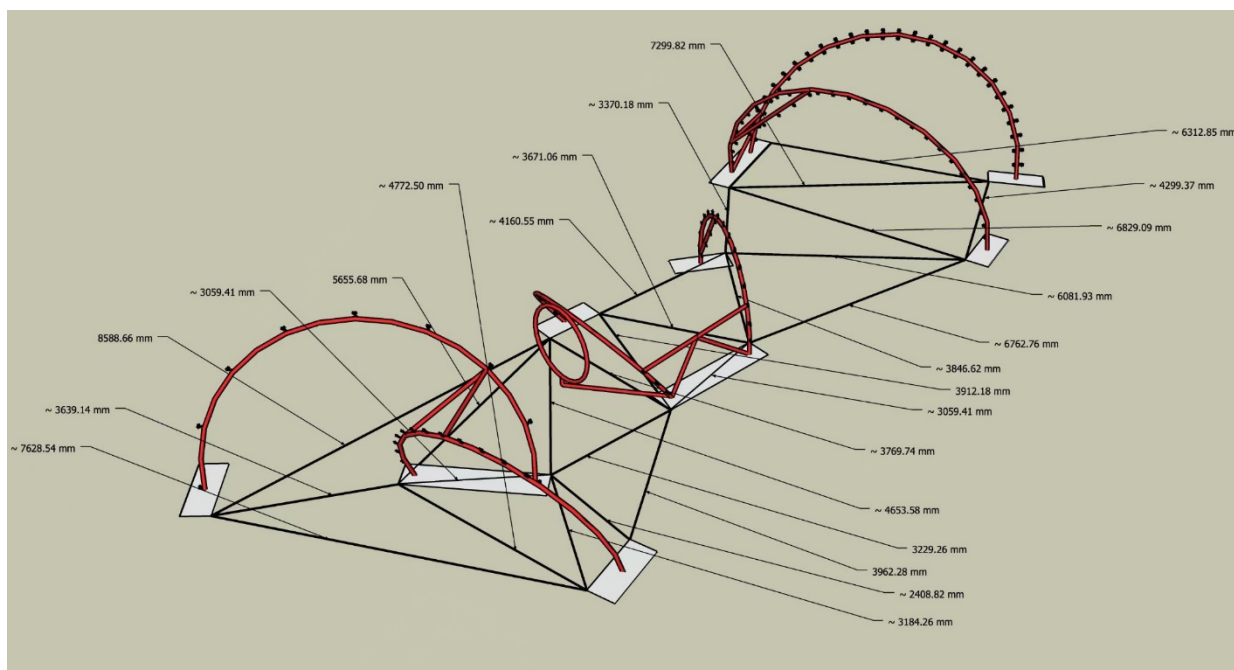


Figura 4. Diseño de los arcos estructurales.

Los arcos se construyeron a partir de andamios metálicos reutilizados, seleccionados por su ligereza, disponibilidad y capacidad para ser ensamblados y desmontados con rapidez. Lejos de funcionar como elementos rígidos aislados, estos marcos estructurales se integraron en un sistema mayor de equilibrio, estabilizado mediante una red de tensores y contrapesos. Las cuerdas recicladas, procedentes en su mayoría de actividades pesqueras, trabajaban a tracción, mientras que los bloques de piedra local aportaban masa y anclaje, permitiendo absorber las cargas horizontales generadas por el viento sin recurrir a cimentaciones permanentes.

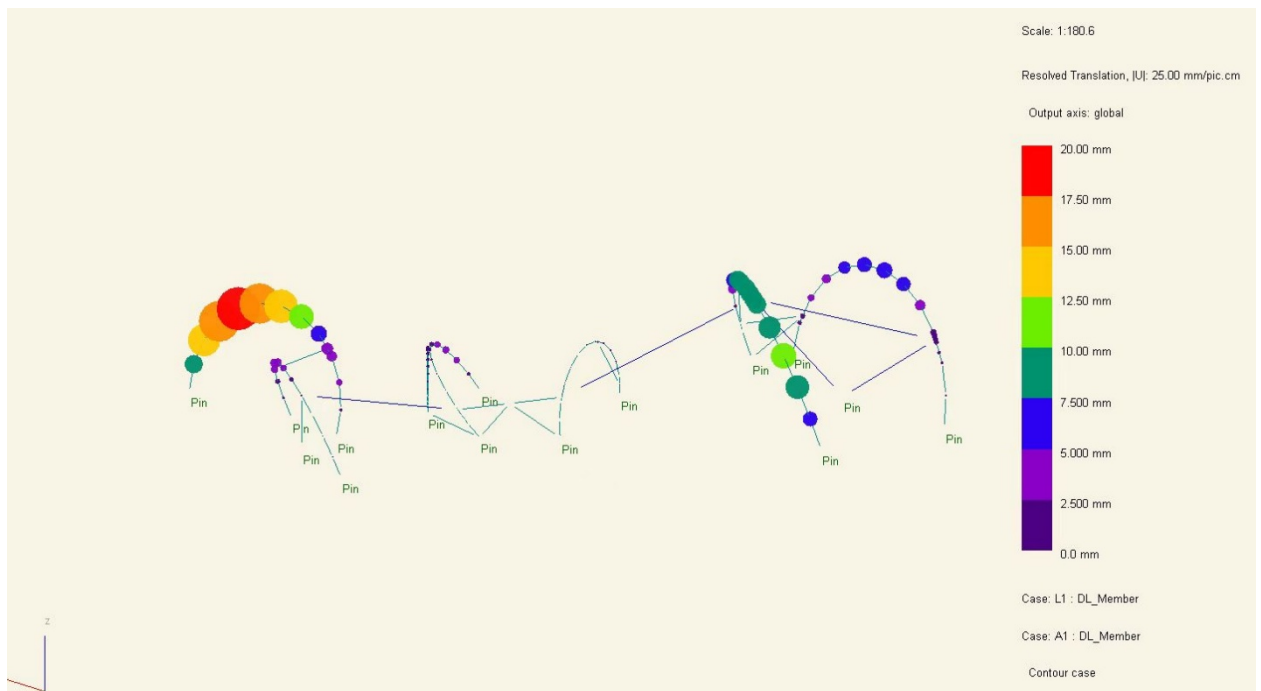


Figura 5. Diseño de los arcos estructurales.

Desde una perspectiva estructural, el proyecto se convirtió en un ejercicio colectivo de comprensión y puesta en práctica del equilibrio entre compresión, tracción y peso propio. Las decisiones constructivas no respondían únicamente a cálculos previos, sino que se ajustaban continuamente durante el proceso de montaje mediante pruebas, observación directa y correcciones in situ. Este enfoque permitió articular un diálogo constante entre los principios empíricos derivados de la artesanía local y nociones básicas de cálculo estructural, que fueron compartidas, discutidas y verificadas de manera colectiva entre estudiantes y docentes.

Las formas resultantes, deliberadamente permeables y visualmente porosas, generaban una secuencia de espacios intermedios que invitaban al recorrido y a la estancia. Las superficies tejidas de redes y cuerdas filtraban la luz, modulaban el viento y proyectaban sombras cambiantes, estableciendo una relación directa entre el cuerpo del visitante y las condiciones ambientales del lugar. De este modo, la estructura no se limitaba a cumplir una función portante, sino que actuaba como mediadora entre arquitectura, paisaje y experiencia sensorial, reforzando el carácter situado y ambiental del proyecto.

Marco pedagógico: aprender construyendo

CO-NET fue concebido como una experiencia pedagógica integral en la que el acto de construir se entendía no solo como una fase final del proyecto, sino como un medio fundamental de aprendizaje crítico. Frente a modelos docentes basados prioritariamente en la representación gráfica, la simulación digital o la resolución abstracta de problemas, el proyecto propuso una inmersión directa en los procesos materiales, sociales y logísticos que configuran la práctica arquitectónica. La construcción a escala real permitió confrontar decisiones de diseño con sus consecuencias físicas inmediatas, haciendo visibles las relaciones entre forma, estructura, material y esfuerzo colectivo.



Figura 6. Instalación de las redes de pesca y de las maromas de atado. Wenzhou-Kean University.

El trabajo con residuos locales introdujo un grado elevado de indeterminación en el proceso proyectual. A diferencia de los materiales normalizados, los elementos recuperados presentaban variaciones de tamaño, resistencia y estado de conservación que obligaron a los estudiantes a revisar continuamente sus hipótesis iniciales. Esta condición favoreció el desarrollo de una actitud flexible y experimental, en la que el error, la prueba y el ajuste se integraron como parte activa del aprendizaje. El proyecto dejó así de entenderse como la ejecución de una solución predefinida para convertirse en un proceso adaptativo, sensible a las condiciones cambiantes del lugar y de los materiales.

La dimensión intercultural del trabajo colectivo fue igualmente central en el marco pedagógico de CO-NET. La colaboración entre estudiantes y docentes de distintos contextos académicos y culturales puso de relieve la importancia de la comunicación, la negociación y la construcción de consensos en entornos de trabajo compartido. Las decisiones técnicas y espaciales se vieron atravesadas por diferencias en los modos de pensar, representar y construir, lo que permitió cuestionar supuestos disciplinarios y enriquecer el proceso desde múltiples perspectivas.



Figura 7. Proceso de atado de las maromas a los arcos estructurales. Wenzhou-Kean University.

La integración de saberes locales desempeñó un papel clave en esta ampliación del campo pedagógico. Técnicas artesanales vinculadas a la pesca y al trabajo manual, tradicionalmente situadas fuera del ámbito académico, se incorporaron como herramientas activas de proyecto. Este cruce entre conocimiento artesanal y reflexión arquitectónica permitió problematizar jerarquías establecidas entre teoría y práctica, así como entender la sostenibilidad no únicamente como una cuestión técnica o normativa, sino como una práctica cultural arraigada en el territorio y en sus economías materiales.

Finalmente, CO-NET se concibió como un sistema reversible, capaz de ser desmontado sin dejar una huella permanente en el paisaje. Esta decisión respondió tanto a criterios ambientales como a una reflexión pedagógica sobre la noción de permanencia en la arquitectura. En un contexto marcado por la obsolescencia acelerada y la transformación constante de los territorios, el proyecto plantea la necesidad de pensar la arquitectura desde la temporalidad, la adaptabilidad y la reutilización. La reversibilidad se convierte así en una herramienta ética y pedagógica, que permite reducir el impacto ambiental, prolongar la vida útil de los materiales y formar a los estudiantes en una comprensión crítica de los ciclos materiales y de la responsabilidad arquitectónica a largo plazo.



Figura 8. Redes de pesca y maromas conectando los arcos estructurales. Wenzhou-Kean University.

Conclusión

Más allá de su contexto geográfico y cultural específico, CO-NET propone un marco metodológico susceptible de ser replicado y adaptado a otros entornos educativos y territoriales. Su énfasis en la construcción circular, la colaboración interdisciplinar y la integración de saberes locales ofrece una alternativa clara a modelos pedagógicos desvinculados de las realidades materiales, sociales y ecológicas en las que opera la arquitectura. En lugar de situar el proyecto exclusivamente en el ámbito de la representación o la especulación formal, CO-NET desplaza el foco hacia procesos de aprendizaje basados en la acción, la materia y la responsabilidad colectiva.

El proyecto demuestra que la enseñanza de la arquitectura puede convertirse en un espacio de experimentación crítica donde el diseño se entiende como un proceso abierto, iterativo y compartido. La incertidumbre asociada al trabajo con materiales recuperados, la necesidad de tomar decisiones en tiempo real y la negociación constante entre distintos agentes convierten la construcción en una herramienta pedagógica de primer orden. En este sentido, CO-NET no se limita a producir una serie de estructuras físicas, sino que genera un entramado de relaciones, aprendizajes situados y preguntas críticas que trascienden el objeto construido y permanecen más allá de su desmontaje.

Asimismo, CO-NET plantea una visión de la arquitectura como práctica situada, consciente de los ciclos materiales y profundamente conectada con su contexto cultural y ambiental. A través de la reutilización de residuos, la reinterpretación contemporánea de técnicas locales y la construcción colaborativa, el proyecto articula una respuesta pedagógica a los desafíos actuales de la disciplina, cuestionando nociones tradicionales de permanencia, autoría y valor material.

En un momento en que la arquitectura se ve obligada a replantear de manera urgente su relación con el medio ambiente y la sociedad, experiencias como CO-NET subrayan la necesidad de modelos educativos que integren ética material, sensibilidad territorial y aprendizaje colectivo. Construir, en este marco, deja de ser únicamente un acto técnico o productivo para convertirse en una forma de conocimiento, de cuidado y de reconfiguración consciente de las relaciones entre personas, materiales y lugares.



Figura 9. Pabellón finalizado. Wenzhou-Kean University.

Circularidad en la arquitectura de tierra. **Estudios de caso de reúso del material**

Circularity in Earthen Architecture. Case Studies on the Reuse of Material.

ROSA LUZ BELLIDO PLA/ Universidad de Valladolid

JUAN JERÓNIMO OLCESE ORTEGA/ Fundación Rehabitar

Palabras clave Keywords

Construcción con tierra, patrimonio, reciclaje, circularidad.

Earthen construction, heritage, recycling, circularity.

Resumen

En las últimas décadas se ha recuperado en España el interés por la construcción con tierra, considerada hoy un material de altas prestaciones en cuanto a sostenibilidad y confort en el hábitat. La desaparición de oficios tradicionales dificulta su puesta en obra, por lo que diversas organizaciones ancladas al territorio están promoviendo conferencias, cursos y talleres para recuperar un conocimiento tanto teórico como práctico. Se han editado manuales y guías con recomendaciones que contemplan desde la selección del material y los procedimientos de consolidación o reparación, hasta la conservación preventiva de arquitectura en tierra de cualquier escala o tipología: de pequeñas construcciones industriales, como chozos o palomares, a grandes fortificaciones. Habitualmente se suele recuperar tierra de muros deteriorados o en ruina para reutilizarla como material para su reparación o reconstrucción, pero esta práctica no se suele reflejar en la literatura. En esta comunicación se recogen varios ejemplos, analizándose dos estudios de caso con recuperación de tierra de antiguos muros en unos talleres de formación. El estudio visibiliza una buena práctica extendida pero poco documentada, relevante para potenciar la circularidad de la construcción con tierra.

Abstract

In recent decades, interest in earthen construction has re-emerged in Spain, where earth is now regarded as a high-performance material in terms of sustainability and indoor comfort. The disappearance of traditional crafts hinders its implementation, prompting various locally rooted organisations to promote conferences and training courses aimed at recovering both theoretical and practical knowledge. Manuals and technical guidelines have been published with recommendations ranging from material selection and consolidation or repair procedures to the preventive conservation of earthen architecture, which includes small vernacular or industrial constructions—such as huts and dovecotes—as well as large fortifications. In practice, earth is often recovered from deteriorated or ruined walls and reused as material for their repair or reconstruction, yet this approach is seldom documented in the literature. This paper presents several examples and analyses two case studies in which earth from old walls was recovered during training workshops. The study highlights a widespread but under-documented good practice that is relevant for strengthening circularity in earthen construction.

Introducción

En el siglo XXI se está potenciando el uso de la tierra, un material empleado en construcción desde el origen de los tiempos al que se reconocen grandes cualidades, para levantar edificios modernos. Es hoy un hecho reconocido en todo el mundo que “la construcción de la tierra obtenida de modo local, como material constructivo, se sitúa en la cima de los materiales más ecológicos” (Arias y Blanco, 2013, 390)

En el ámbito del patrimonio las actuaciones de conservación y restauración de numerosos inmuebles requieren poner en valor materiales y sistemas constructivos que habían quedado en desuso en la segunda mitad del siglo XX. También en muchas poblaciones españolas están construidas con tierra tanto viviendas como construcciones de tipo industrial que requieren conocimientos para llevar a cabo unas actuaciones de mantenimiento adecuadas.

La presente comunicación contempla como, a pesar de que la reutilización de tierra de muros arruinados para su reconstrucción evitando el aporte de nuevos materiales podría considerarse un epítome de circularidad, este tipo de actuaciones se mencionan solo ocasionalmente en manuales y guías, siendo además escasa la documentación de casos concretos realizados en España.

En este estudio se documentan varios ejemplos y se analizan dos estudios de caso a partir de la experiencia de unos talleres de formación coordinados por los técnicos especialistas de Oigaestudio para recuperar técnicas constructivas tradicionales de construcción con tierra, promovidos por dos pequeñas fundaciones ancladas al territorio de Valladolid y Palencia. En el primer caso se abordó la restauración de construcciones de tipo industrial vernáculo, rehabilitándose un conjunto de palomares. En el segundo se reconstruyó un lienzo de arquitectura palaciega.

Los ejemplos analizados no solo ejemplifican la circularidad del empleo de tierra reciclada, sino que inducen a plantear numerosos aspectos transversales de gran importancia, como el fomento de la reconstrucción de patrimonio en territorios en proceso de despoblación y la formación en oficios tradicionales casi extinguidos.

Antecedentes

En muchos casos aún se interviene hoy sobre construcciones de tierra empleando sistemas inadecuados. Tras el análisis de 1.787 edificios repartidos en España en una tesis doctoral se concluye:

La mayoría de las intervenciones realizadas en estos edificios son acciones inconexas de reparación y actualización llevadas a cabo por los propios dueños. Por su parte, el papel de los técnicos en la redacción de los proyectos de arquitectura y la supervisión de las obras parece escasa, incluso cuando la envergadura de estas hace necesaria la planificación de los trabajos... Por lo que respecta a las técnicas de intervención empleadas, existe un predominio muy marcado del uso de materiales industrializados, como el cemento o el ladrillo hueco. El empleo de materiales y técnicas tradicionales de intervención se reduce a unos pocos ejemplos observados en reparaciones antiguas o desarrolladas en el marco de actuaciones integrales de restauración” (Gómez-Patrocinio, 2018, 249)

En los casos en que se interviene empleando materiales tradicionales compatibles, si se revisan las dos guías más relevantes y completas publicadas en España sobre la construcción con tierra no aparece reflejada explícitamente una recomendación para recuperar material de muros de tapia o adobe deteriorados o en ruinas.

En el texto publicado a raíz del proyecto Coremans “Criterios de intervención en la arquitectura de tierra” se describen una serie de pautas para limpiar, consolidar y reparar construcciones de tierra, incluyendo ruinas y restos arqueológicos (Mileto y Vegas, 2017). Recomienda emplear técnicas y materiales tradicionales similares a los existentes, pero no da indicaciones expresas sobre la posibilidad de recuperar y reutilizar materiales de las propias fábricas.

Esta recuperación, sin embargo, es algo que con frecuencia se da por sentado, por ejemplo Mileto y Vegas (2014, 288) también, en “La restauración de la tapia en la Península Ibérica” mencionan que en la intervención sobre la muralla de Daroca, en Zaragoza, el año 2006, “previamente a cualquier prueba, se han saneado las superficies irregulares de ambas caras de los muros y de su coronación, acopiando las tierras sueltas para su posterior reutilización”.

Hay algunos ejemplos de uso de la tierra reutilizada para elaborar revestimientos, como en la rehabilitación de una vivienda tradicional en un pueblo de Soria, en el monográfico de Informes de la construcción, que se describe de la siguiente forma: “todo el material de relleno de bajo cubierta, entresijos y adobes procedentes de particiones interiores se reutilizó, tamizado con cedazos de 2 mm de luz de modo que se obtuviera una tierra muy fina, que junto con distintas dosificaciones de arena y fibras

permitiera obtener un revestimiento de barro de aspecto natural, de fácil aplicación y reutilizable, con una textura y resistencia superficial adecuada" (Castilla 2011).

Se han documentado en varios países casos de reutilización de los restos de muros de tierra para reconstruir fábricas dañadas por terremotos. Una reflexión interesante en estos escenarios es la de D'Alençon y Visconti (2016) cuando afirman que además de la eficiencia económica de estos procesos, destaca el valor simbólico del empleo de unos materiales procedentes del propio patrimonio para su reconstrucción tras una catástrofe. En Chanco (Chile), tras un terremoto en 2010, se reutilizaron adobes de viviendas dañadas, acopiados cuidadosamente por los propios vecinos

En Portugal, en una comunicación del ICMSE (Costa y Tavares 2021) se registran prácticas de recuperación de adobes para fabricar nuevos elementos compatibles, en un estudio técnico que plantea protocolos de caracterización y manipulación, aunque incluye otros materiales como ladrillo y se propone básicamente esta reutilización para elaborar morteros.

En Chile, en un estudio para comparar medioambientalmente una pequeña vivienda construida actualmente mediante quinchá (con madera y tierra) con otro tipo de sistemas, se describe un proceso constructivo en el que se menciona que "la tierra procede principalmente del entorno cercano a la obra, con un 20% de la mezcla compuesto por adobes recuperados de edificios abandonados" (Dipasquale, 2025).

En España, Fermín Font la emplea habitualmente en sus intervenciones sobre fortificaciones andalusíes. Así en el Castell Vell de Castelló se llevaron a cabo 5 intervenciones (fases), y excepto en la última, porque ya no había que excavar, en el resto se empleó para hacer las tapias la tierra de las excavaciones. En el castillo de Oropesa del Mar, en las 3 fases se construyó con tapia empleándose la tierra de las excavaciones (Font, 2013, pp.211).

La tierra empleada en la consolidación y recrecido de tapias fue la procedente de las excavaciones. En la primera intervención, a diferencia de otras ocasiones en las que este equipo ha efectuado trabajos similares (2), no se realizaron ensayos de caracterización de las tierras, ni se halló el grado de compactación alcanzado en los muros, ensayos que sí se hicieron en los trabajos de la torre noroeste (1).

(1) La caracterización de las tierras dieron como resultado que la tierra empleada, aun sin ser de calidad, sí era adecuada para hacer tapias, tal como se había percibido en la anterior intervención. Entre los resultados de los ensayos podemos citar que el próctor modificado dio una densidad máxima de 1870 kg/m³ para un grado de humedad del 12,8% y una resistencia a compresión de 34 Kg/cm².

Se emplearon de encofrados paneles de contrachapado fenólico, sujetos en su parte inferior mediante agujas pasantes de madera y con un sistema de costales y agujas superiores, similares al empleado tradicionalmente en la comarca de Els.

Actualmente, Font se encuentra trabajando en un pequeño castillo en un pueblo de València llamado Segart, en donde emplea también la tierra de las excavaciones arqueológicas para levantar las tapias. En esta torre, como en la de Cullera, semicircular de mampostería se reforzó envolviéndola con fábrica de tapia de tierra (Fig. 1).





Figura 1. Imágenes de obra en Segart, envolviendo la torre con tapia de tierra. Fuente: cedidas por Fermín Font

Metodología: casos de estudio

Se proponen como casos de estudio para analizar el empleo de tierra procedente de fábricas deterioradas para proceder a su restauración, dos talleres de reconstrucción y rehabilitación de patrimonio construido en tierra llevados a cabo en 2021. Fueron promovidos por dos pequeñas fundaciones sin ánimo de lucro ancladas al territorio rural de Castilla y León.

La Fundación Rehabitar persigue fomentar y poner en valor la arquitectura tradicional de la comarca de Tierra de Campos con especial atención al patrimonio construido en tierra mediante la prestación de servicios que favorezcan el desarrollo social, económico, medioambiental y cultural, con programas de dinamización, formación, promoción y desarrollo de nuevas fuentes de riqueza.

La Fundación Antonio Font de Bedoya tiene el objetivo de difundir el empleo correcto de los sistemas y materiales de construcción tradicionales para que sean utilizados de modo adecuado en las restauraciones practicadas a edificios levantados con estos métodos y además procurar que los citados materiales se empleen también en proyectos de arquitectura actual

Se trataba en ambos talleres de aprovechar en la medida de lo posible los materiales acumulados por diversos derrumbes en cada caso, acopiando ladrillos y piedras, pero sobre todo la tierra, por su facilidad de reutilización al no tener que realizar una preparación de nueva tierra sin tamizado en algunas de las técnicas utilizadas, de lo que se puede deducir una sencilla metodología para la reutilización de tierras.

Palomares

Entre el 30 de agosto y el 3 de septiembre de 2021 se celebró el taller teórico-práctico “Tres palomares, tres revocos”, desarrollado en los palomares tradicionales de Villamartín de Campos, Revilla de Campos y Villafrades de Campos (provincia de Palencia). Se trata de construcciones de planta circular construidas con materiales locales destinadas originalmente para la cría de palomas que forman parte del patrimonio industrial, edificado y paisajístico de la extensa comarca Tierra de Campos (Fig. 2)..

El taller, organizado por la Fundación Antonio Font de Bedoya y coordinado por Giovanni Olcese y Julio Garcés del equipo técnico de la Fundación Rehabitar, combinó sesiones de diagnóstico, ensayos previos y prácticas de obra centradas en la conservación de fábricas de tapia y la aplicación de revocos de tierra, trulla y cal. Las intervenciones se apoyaron en una lectura atenta de las patologías existentes, especialmente la erosión superficial, las oquedades y la pérdida progresiva de sección de los muros, entendidas como procesos inherentes a este tipo de arquitectura y abordadas desde criterios de compatibilidad y mínima alteración.



Figura 2. Fotografía de un tractor levantando la tierra desprendida del palomar para su reutilización en Villafrades de Campos, dentro del taller “Tres palomares, tres revocos” realizado en 2021. Fuente: Giovanni Olcese.

Un aspecto central del taller fue la reutilización de la tierra procedente del propio edificio, recuperada tanto de los revocos desprendidos como del material resultante de la desagregación y desgaste de los muros de tapia. Esta tierra fue caracterizada mediante ensayos de granulometría, plasticidad y Test de Carazas, y posteriormente reincorporada a nuevas mezclas para retacados, relleno de huecos y ejecución de capas base y acabados. Esta metodología permitió cerrar el ciclo material de la intervención, reducir aportes externos y reforzar una práctica constructiva coherente con la arquitectura vernácula de Tierra de Campos, poniendo en valor la tierra existente como recurso técnico, patrimonial y ambiental en los procesos de conservación y mantenimiento de los palomares tradicionales. La tierra procedente de recuperación tuvo que ser tamizada para su uso como revoco ya que procedía en gran parte de tapia donde se encontraban áridos de más de 10mm y restos de cerámicas.

Palacio

También en septiembre de 2021 se desarrolló en Grajal de Campos el taller “Recuperación y revalorización del patrimonio inmaterial ligado a las técnicas de adobe y tapia en Tierra de Campos”, centrado específicamente en la reconstrucción de una tapia encadenada del Palacio renacentista de los Vega, que forma parte del conjunto histórico BIC de Grajal de Campos.

La intervención abordó un tramo de muro que se encontraba desplomado, gravemente dañado y sin posibilidad de recuperación, optándose por su desmontaje previo. La actuación tuvo como objetivo restituir el elemento constructivo respetando su lógica estructural y material, garantizando la compatibilidad con el sistema histórico del conjunto monumental (Fig. 3).

El taller fue elaborado y dirigido por el equipo técnico de la Fundación Rehabitar. Para la ejecución de la nueva fábrica se reutilizó la tierra procedente de la demolición de la tapia original, tras su adecuación y ensayo, aplicando la técnica tradicional de tapia vertida. Este proceso permitió cerrar el ciclo material de la intervención, reduciendo el impacto ambiental y reforzando los criterios de sostenibilidad y autenticidad constructiva. La reconstrucción combinó la recuperación patrimonial con la transmisión práctica de conocimientos tradicionales, fundamentales para la conservación del patrimonio de tierra en Tierra de Campos.



Figura 3. Fotografía del estado previo de la tapia encadenada del patio del palacio de Grajal de Campos en el ámbito del taller realizado en 2021. Fuente: Giovanni Olcese.

Se pone de relevancia que la técnica de la tapia vertida facilita la reutilización de tierra existente o incluso de escombros existentes en la zona, trozos de ladrillos y tejas. También se aprovecharon ladrillos de la demolición para la construcción de las cadenas de la tapia.

Análisis

La construcción con tierra en España hoy presenta aún dos barreras: la primera es la falta de una normativa específica (solo hay norma UNE para los bloques de tierra compactada BTC) y la segunda de tipo social, ya que en algunos casos aún se mantiene un estigma asociado al carácter vernáculo de muchas construcciones de tierra que llevan a considerarlo un material pobre a pesar de su uso abundante en conventos, iglesias y fortificaciones.

Los dos estudios de caso, que corresponden a tipologías tan diferentes como un palomar y un palacio, presentan aspectos comunes a la hora de intervenir sobre sus fábricas y muestran que la técnica funciona.

Proceso de reciclado

La reutilización de tierras procedentes de ruinas o derribos debe comenzar siempre con una fase de caracterización, dado que estos materiales pueden haberse mezclado con otras tierras o haber incorporado sales solubles por efecto de la humedad. Se recomiendan ensayos básicos como el análisis granulométrico por tamizado, la determinación del contenido de finos, el ensayo de sedimentación, la identificación visual y táctil de arcillas y, cuando sea necesario, ensayos de sales solubles y de retracción. Esta fase permite evaluar la idoneidad del material y prevenir posibles patologías en su reutilización. Tras la caracterización, se puede proceder a la dosificación y ajuste de la composición de la tierra para adecuarla a la técnica constructiva prevista.

Las tierras procedentes de tapia suelen haber perdido su cohesión original tras el derrumbe, especialmente en presencia de agua, por lo que pueden reutilizarse directamente en nueva tapia tras un cribado ligero. Para su uso en adobes o revocos, es necesario un tamizado, debido a la presencia habitual de áridos gruesos y restos de cascotes. Como criterio orientativo, se recomienda un tamaño máximo de árido de 10–15 mm para tapia, 5–10 mm para adobes y 2–3 mm para revocos.

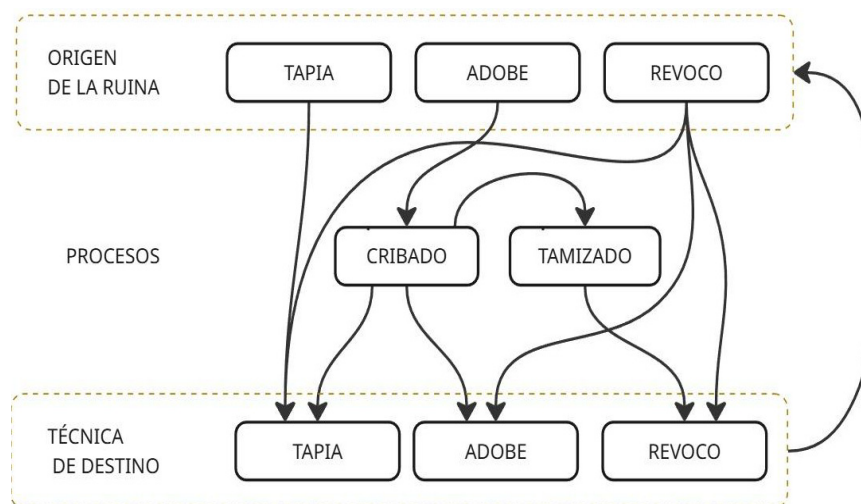


Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología

Las tierras procedentes de adobes conservan normalmente parte de su cohesión, lo que hace necesario un cribado previo para desmenuzar el material. Este proceso es suficiente para su reutilización en tapia o en nuevos adobes, mientras que para revocos se requiere un tamizado adicional que garantice una granulometría fina y homogénea. Según Bruno et al. (2024), tras tres ciclos de reciclaje los adobes tradicionales conservan sus propiedades mecánicas, físicas y térmicas, sin pérdidas significativas de resistencia ni alteraciones higrotérmicas. Estos resultados confirman la reversibilidad de la cohesión del material y su viabilidad para una reutilización reiterada en el marco de la construcción sostenible y la economía circular.

Por último, las tierras procedentes de revocos presentan, en general, una granulometría adecuada para su reutilización directa en tapia, adobe o revoco, tras su caracterización y un ajuste básico de la humedad o de la composición si fuera necesario.

Una técnica destacable para la reutilización de tierras es la tapia vertida. Según dosificaciones ya ensayadas (Bellido et al, 2020) puede asumir una gran cantidad de tierras recicladas sin ningún tipo de tratamiento previo al ser una mezcla amasada normalmente por medios mecánicos y con alto contenido en agua. Se consigue una mezcla homogénea y fluida.

Este procedimiento ordenado asegura la compatibilidad técnica entre el material recuperado y la técnica de destino, favoreciendo una reutilización segura, eficiente y coherente con los sistemas constructivos de tierra (Fig. 4).

Conclusiones

Aún se emplean materiales y procedimientos inadecuados en muchos casos al intervenir sobre construcciones de tierra en España, generalmente por desconocimiento y falta de normativa.

Se confirma que la reutilización de tierra de muros existentes para emplearla en su reparación o reconstrucción es una práctica habitual en las intervenciones, pero se encuentra poco documentada.

La reutilización de la tierra de muros derruidos permite cerrar el ciclo material, reducir aportes externos manteniendo las propiedades mecánicas, físicas y térmicas incluso tras varios ciclos de reciclaje.

Restaurar construcciones tradicionales e históricas con la propia tierra del edificio asegura compatibilidad estructural y estética, reforzando la autenticidad de la intervención.

Usar una metodología de reutilización definida según la técnica del origen y destino de las tierras garantiza la compatibilidad, prevención de patologías y adecuada cohesión del material.

Persisten la falta de normativa específica y estigmas sociales que consideran la tierra un material “inferior”, limitando su reconocimiento y uso.

Aunque la práctica de reutilización de la tierra es frecuente, está poco registrada y documentarla puede facilitar la replicabilidad reforzando aún más la circularidad de la construcción con tierra.

Referencias

- Arias, J. y Blanco, J. (2013). La tierra en la construcción de cerramientos con materiales de reciclaje. *Construcción con tierra. Patrimonio y Vivienda. X CIATTI. Congreso de arquitectura de tierra en Cuenca de Campos 2013*. [online]. Valladolid: Cátedra Juan de Villanueva, Universidad de Valladolid, 2013, pp. 389-396.
- Bellido Pla, R., Villena Marcos, I., Olcese, J. J., y Font Arellano, J. (2020). Traditional dovecotes restoration and reuse in Castilla-León, Spain. *Proceedings of REHABEND 2020: Construction pathology, rehabilitation technology and heritage management*. Granada, España. pp. 98-98.
- Bruno, A., Laborel-Préneron, A., Magniont, C. y Aubert, J. E. (2024). Recyclability of vernacular adobes with high chalk content in the context of sustainable construction. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03028. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03028>
- Campos, M.D. y Pérez Gil, J. (2018). *El conjunto histórico de Grajal de Campos*. Universidad de León.
- Castilla, F. J. (2011). Revestimientos y acabados superficiales en construcciones con tierra contemporáneas. *Informes de la Construcción*, 63(523), pp. 143-152
- Costa, A. y Tavares, A. (2021). Reuse of earthen construction materials to Eco-design of Earthen Architecture in Portugal. *Actas ICMSE International Conference on Built Environment and Eco_Design*.
- D'Alençon, R. y Visconti, C. (2016). Community-Based initiatives in post catastrophe scenarios: potentials and limitations to academic involvement and "learning by doing". *UPLanD – Journal of Urban Planning, Landscape & environmental Design*, 1(1), pp. 171-186.
- Dipasquale, L. et al. (2025) Sustainable Design of a Tiny House: using a Life Cycle approach. *Buildings* 2025 15(3), pp. 491 <https://doi.org/10.3390/buildings15030491>
- Font, F. (2013). Diversas intervenciones en una torre de tapia de tierra en el castillo de Oropesa del Mar, Castellón. *Construcción con tierra. Patrimonio y Vivienda. X CIATTI. Congreso de arquitectura de tierra en Cuenca de Campos 2013*. Valladolid: Cátedra Juan de Villanueva. Universidad de Valladolid. pp. 209-216.
- Gómez Patrocinio, F. J. (2018). *Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención*. [Tesis doctoral] Universitat Politècnica de València.
- Mileto, C., y Vegas, F. (2014). *La restauración de la tapia en la Península Ibérica. Criterios, técnicas, resultados y perspectivas*. Valencia/Lisboa: TC Cuadernos/Argumentum.
- Mileto, C. y Vegas, F. (2017) *Proyecto COREMANS Criterios de intervención en la arquitectura de tierra*. Madrid Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

Paneles de fibras naturales recicladas. Nuevos materiales a partir de excedentes vegetales

Recycled natural fiber panels. New materials from surplus plant material

FÉLIX JOVÉ-SANDOVAL/ Universidad de Valladolid

EVA GARCÍA-BAÑOS/ Universidad de Valladolid

MAR BARBERO-BARRERA/ Universidad Politécnica de Madrid

Palabras clave Keywords

Arquitectura tradicional, transmitancia térmica, paja de cereal, construcción con tierra, adobe.

Traditional architecture, thermal transmittance, cereal straw, earth construction, adobe.

Resumen

La investigación se adscribe a la línea de trabajo sobre la fabricación de nuevos materiales que incorporen residuos procedentes de sectores ajenos a la construcción. Se trata de la reutilización de residuos procedentes del sector agrícola utilizados como materia prima para la fabricación de nuevos materiales de construcción. En esta línea de trabajo, los materiales “composite” en base tierra y fibras naturales están experimentando un creciente interés como materiales de bajo impacto ambiental obtenidos a partir de un residuo; es decir, transformado el desecho en materia prima. Tradicionalmente, la paja y otros residuos vegetales han sido utilizados en el sector de la arquitectura tradicional para la fabricación de adobes o como ligante de morteros de tierra para la realización de revocos y enlucidos de paramentos. El objeto de la presente investigación es determinar la idoneidad de un nuevo material de construcción en base a paja de cereal y barbotina de barro. Se trata de paneles, de distinta composición y espesores, que puedan ser utilizados en la mejora del aislamiento térmico de muros ya construidos o en la ejecución de tabiques de separación o cámaras interiores. Los ensayos preliminares han demostrado que los paneles fabricados mejoran considerablemente los valores de transmitancia térmica del muro objeto ensayado.

Abstract

This research falls within the line of work on the manufacture of new materials that incorporate waste from sectors other than construction. It focuses on the reuse of agricultural waste as raw material for the production of new building materials. Within this line of work, earth-based composites and natural fibers are experiencing growing interest as low-environmental-impact materials obtained from waste; that is, waste transformed into raw material. Traditionally, cereal straw and other plant waste have been used in traditional architecture for the manufacture of adobe bricks or as a binder in earth mortars for plastering and rendering walls. The aim of this research is to determine the suitability of a new building material based on cereal straw and clay slip. This material consists of panels of varying composition and thicknesses that can be used to improve the thermal insulation of existing walls or in the construction of partition walls or interior cavities. Preliminary tests have shown that the manufactured panels significantly improve the thermal transmittance values of the tested wall.

Introducción

La investigación se adscribe dentro de la primera línea de reflexión del Congreso, titulada “Materiales de segunda vida: reciclaje y revalorización en la construcción” que engloba trabajos de investigación sobre la utilización de materiales que incorporan residuos procedentes de sectores ajenos a la construcción. En este caso, se trata de la reutilización de residuos procedentes del sector agrícola utilizados como materia prima para la fabricación de nuevos materiales de construcción.

Esta línea de trabajo está experimentando un creciente interés en el sector de la construcción debido a que permite la obtención de materiales de bajo impacto ambiental fabricados a partir de un residuo; es decir, transformado el desecho en materia prima. Los autores vienen trabajando en esta línea de investigación desde hace unos años, con la publicación de diversos trabajos científicos (2018, pp.205-213; 2023, pp.240-241; 2024, pp.71-77). En particular, la presente investigación está dirigida a la fabricación de materiales “composite” en base tierra y fibras naturales, y en el caso concreto que nos ocupa, en la fabricación de paneles aislantes para la mejora del aislamiento térmico de los edificios.

Este nuevo material se concibe, inicialmente, para su aplicación en el patrimonio edificado de los núcleos de población del medio rural debido a cuestiones de proximidad del material, economía circular, y fabricación de materiales km0. Sin embargo, dados los resultados obtenidos, y las nuevas exigencias de sostenibilidad ambiental en la edificación como consecuencia de la lucha contra el cambio climático, no se descarta su posible aplicación en viviendas de nueva construcción. Su utilización significa tomar en consideración las estrategias alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible¹.

Las fibras naturales utilizadas en la elaboración de los paneles aislantes han sido, precisamente, las de la paja procedente de los cuatro cereales predominantes en la zona de estudio: trigo, cebada, centeno y avena (Fig. 1). Tradicionalmente, la paja de cereal y otros residuos vegetales han sido utilizados en el sector de la arquitectura para la fabricación de adobes o como ligante de morteros de tierra para la realización de revocos y enlucidos de paramentos verticales. Es posible afirmar que la paja ha estado siempre en diálogo con el medio rural y en armonía con la arquitectura de sus núcleos de población.



Figura 1. Pacas de paja de trigo apiladas. Fuente: Félix Jové-Sandoval.

Nuevos materiales a partir de excedentes vegetales

Actualmente, como consecuencia de la aparición de nuevos modelos de explotación agrícola extensiva y la pérdida de la cultura constructiva tradicional, la paja comienza a ser un excedente, y por lo tanto un residuo, que puede tener nuevas oportunidades de uso incorporándola en la producción de nuevos materiales de construcción. Sin embargo, la paja de cereal no siempre es considerada un residuo ya que posee abundantes aplicaciones en las explotaciones agrícolas y ganaderas. En la agricultura ha sido

¹ <https://www.mdsocialesa2030.gob.es/agenda2030/index.htm>

utilizada tradicionalmente para acolchado del terreno y para abonado de los campos de cultivo; y en la ganadería para alimento del ganado rumiante y como cama para los animales -fundamentalmente para caballerías, ganado bovino y ovino- formando, mezclada con los propios excrementos de los animales, el estiércol para su posterior uso como abono. La paja de cereal también ha sido utilizada, y sigue siendo utilizada, como alimento para el ganado, de manera que es considerada un alimento -aunque de calidad mediocre- para los rumiantes, únicos animales capaces de digerir la celulosa contenida en la paja gracias a la actividad microbiana de su estómago. Para hacer más apetecible la paja, y mejorar su valor nutritivo, actualmente suelen añadirsele piensos y diversos productos nutricios.

Tras la recolección del cereal, la paja queda dispuesta en el campo en hileras como un “subproducto” de este proceso que posteriormente se recoge y empaca mecánicamente. En las áreas cerealistas, las “pacas” o fardos de paja inundan, tras la época de la siega, el paisaje y los campos de cultivo, dando lugar a paisajes encontrados en los que crecen, a modo de “castillos” o grandes edificios, construcciones de paja antes nunca vistas (Fig. 2). En realidad, la “paca” es la versión moderna e industrializada de la tradicional “gavilla”, que agrupaba porciones más o menos regulares de paja en haces, o grandes manojos, que posteriormente se unían a mano formando las gavillas. En la zona de estudio, la paja más común es la proveniente del cultivo de los cereales anteriormente citados cultivados en mayor o menos cantidad.

Actualmente, alguna de aquellas aplicaciones tradicionales de la paja empieza a estar en desuso por los cambios producidos en las explotaciones agrícolas y ganaderas, y como consecuencia del fenómeno de la despoblación del medio rural y la pérdida de la cultura constructiva tradicional. Además de por los factores anteriormente citados, la paja resulta ser también un excedente los años en que la producción cerealista es muy abundante, no siendo capaz de absorberlos otro tipo de industrias, es por ello que una cantidad de ese excedente –que terminará siendo un residuo- podría ser absorbido por la industria de la construcción.

En este sentido, el estudio de este material y su adaptación a la normativa actual nos conduce a la necesidad de analizar sus componentes, y el propio material resultante, desde una visión técnica que facilite su implementación en la construcción contemporánea teniendo en cuenta todos los beneficios que aporta al ser un recurso local, respetuoso con el entorno y que presenta enormes ventajas de confort térmico y acústico.



Figura 2. Paisaje transformado por “castillos” de pacas de paja de cereal. Fuente: Félix Jové-Sandoval.

Materiales

Tierra y barbotina

La tierra utilizada en la fabricación de los adobes para la ejecución del muro de referencia y para la elaboración de la barbotina que ha servido como ligante de las fibras vegetales en la ejecución de los paneles ha sido recogida en el municipio de Cuenca de Campos (Valladolid). Esta tierra (earth-CC) viene siendo utilizada desde hace unos años en diferentes trabajos por el equipo de investigadores, y ha sido

caracterizada mediante ensayos de laboratorio siguiendo la metodología aplicada por CRAterre². Se han llevado a cabo los siguientes ensayos:

1. Granulometry: la porción elegida de tierra se criba con los tamices: 20 mm, 10 mm, 5 mm, 2 mm, 1 mm, 0,4 mm, 0,2 mm y 0,08 mm que corresponden a las piedras, gravas, arenas, limos y arcillas presentes en la tierra. Esta proporción es determinante para la técnica constructiva adecuada para esta tierra.
2. Sedimentary test: se centra en analizar la fracción pasante en el tamiz de 0,08mm. Este test sirve para completar la granulometría.
3. Atterberg tests: determinan el límite líquido y plástico, es decir la plasticidad y cohesión de la tierra.
4. Methylene blue: El ensayo con azul de metileno nos indica la superficie específica que tiene la arcilla estudiada, que es la relación entre el área total de un sólido y su masa.

Los ensayos realizados en cuanto a la clasificación granulométrica y sedimentación evidencian una tierra con la fracción de finos (menores a 0,08mm) que representan más de un 60 % del peso total. Los resultados obtenidos se muestran en la curva granulométrica (Fig.3), en la que la línea amarilla se corresponde con la tierra analizada y la línea negra con la curva idónea, mientras que la franja de color verde se corresponde con el uso admisible de una tierra para ser utilizada en la fabricación de adobes³. Como puede observarse, la tierra de referencia earth-CC, se encuentra dentro del uso admisible y es considerada óptima para la fabricación de los materiales del presente trabajo de investigación.

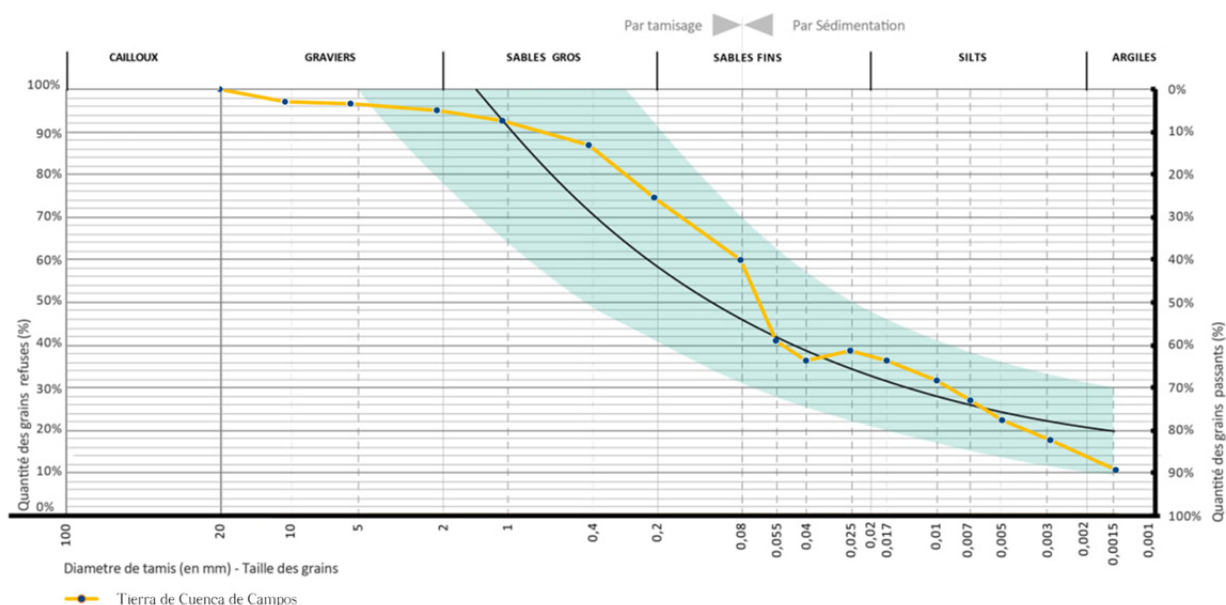


Figura 3. Curva granulométrica, tierra de referencia earth-CC, insertada en base CRAterre. Fuente: Los autores.

En cuanto a los límites de Atterberg determinaron que se trata de una tierra con una plasticidad media y medianamente cohesiva. Y el análisis de azul de metileno, que el valor para la fracción usada es de 3 cm³/g, lo que corresponde con un umbral de la tierra que puede ser limo arenoso / areno arcillosa. El valor de la superficie específica es de 63 m²/g, que podría corresponderse con una arcilla de tipo Caolinita (10-70m²/g), aunque este dato debería confirmarse con ensayos específicos.

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos de laboratorio se confirma que la tierra utilizada presenta una gran fracción de finos (limos y arcillas) que alcanzan el 60% del peso total, aunque la

² Centro internacional de investigación de la construcción con Tierra. Université de Grenoble (Francia). <http://craterre.org/>.

³ Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue. Ministère de la transition écologique et solidaire, République Française. https://www.asterre.org/media/pages/la-terre-crue/ressources-documentaires/les-guides-de-bonnes-pratiques/7806ecbbb8-1668082390/gbp_enduit_20-web.pdf

cantidad contenida de arena es a considerar (más de un 30%). Este último dato determina la plasticidad y cohesión, que alcanzan valores medios.

La tierra es también óptima para la elaboración de la barbotina. La barbotina es una mezcla de tierra muy plástica, que se mezcla con una gran cantidad de agua, para que se mantenga en estado líquido y pueda mezclarse con la paja de cereal ligando las fibras una vez que se seca. La barbotina debe dejarse en reposo durante un tiempo mínimo de 24 horas para que las arcillas se «activen» y conseguir su mayor plasticidad antes de mezclarse con las fibras. (Fig. 4).

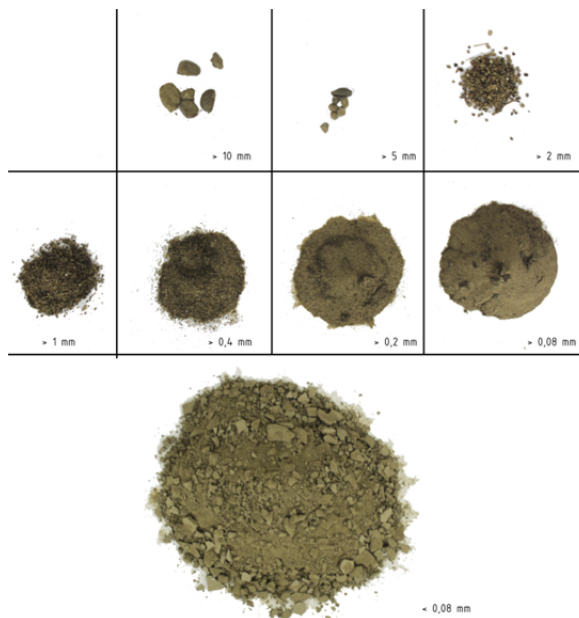


Figura 4. Granulometría descriptiva, tierra de referencia earth-CC. Fuente: Los autores.

Fibras vegetales

Con el objeto de determinar la idoneidad de las fibras a utilizar en la fabricación de los paneles, se han realizado Ensayos de Caracterización de las diferentes pajas de cereal. Se ha comprobado que tradicionalmente ha sido utilizada de forma mayoritaria la paja de trigo y cebada, seguida de la de centeno y avena. Esta distribución es coherente con el cultivo cerealista predominante en la zona de estudio.

Uno de los aspectos fundamentales ensayados ha sido la forma y longitud de las fibras, ya que de ella depende la adherencia a la masa arcillosa. Los parámetros de la forma y diámetro son inherentes a la clase de fibra vegetal, sin embargo, su longitud óptima, puede ser determinada por valores obtenidos en Laboratorio. En la investigación preliminar han sido utilizadas dos longitudes bien diferenciadas de cada una de las fibras con el objeto de determinar, con total claridad, la diferencia de comportamiento del material en función de la longitud de la fibra. A partir de esa determinación podrá abordarse una segunda fase de la investigación que permita determinar la longitud óptima.

Las longitudes de ensayo consideradas han sido las siguientes:

Larga/ long (LX): longitud superior a 12 cm.

Corta/ sorth (LS): longitud comprendida entre 2 y 5 cm.

La longitud LX se corresponde con la paja procedente de la siega, mientras que LS se corresponde con el rango de longitud de la “paja picada” que normalmente se comercializa; se trata de paja cortada en trozos pequeños cuya longitud oscila entre los 2 a 5 cm -aunque puede haber variaciones de longitud en un pequeño porcentaje hasta los 7 cm- (Fig. 5). La paja se corta en trozos pequeños para mejorar su manejo, y la absorción y digestibilidad por parte de los animales. También por comodidad en la ejecución de las camas para los animales, haciéndolas más uniformes. La paja picada mejora el bienestar animal y colabora a la sostenibilidad ambiental de las granjas al utilizar un subproducto agrícola biodegradable.

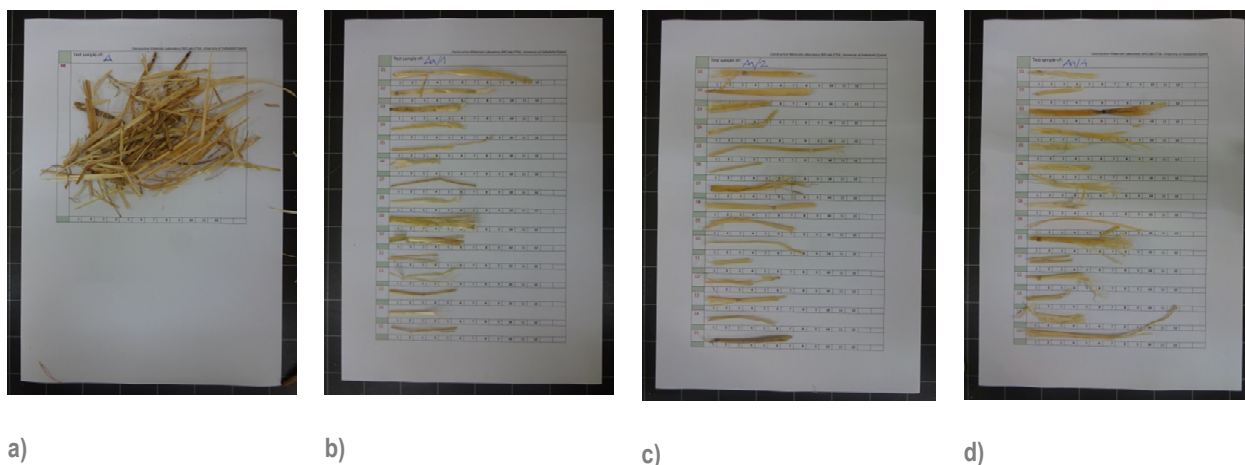


Figura 5. Caracterización de las fibras vegetales. Paja de trigo a) b) c) d). Fuente: Los autores.

Paneles

Finalmente, los paneles aislantes fueron fabricados en tres espesores diferentes, e: 3cm, 6cm y 8cm. Para dar forma a los paneles fue utilizado un molde de madera similar al que tradicionalmente se utiliza para la fabricación de los adobes, de dimensiones 35cm x 16cm, y espesor variable. Su secado se llevó a cabo durante tres semanas (21 días) a temperatura y humedad del laboratorio (Fig. 6).

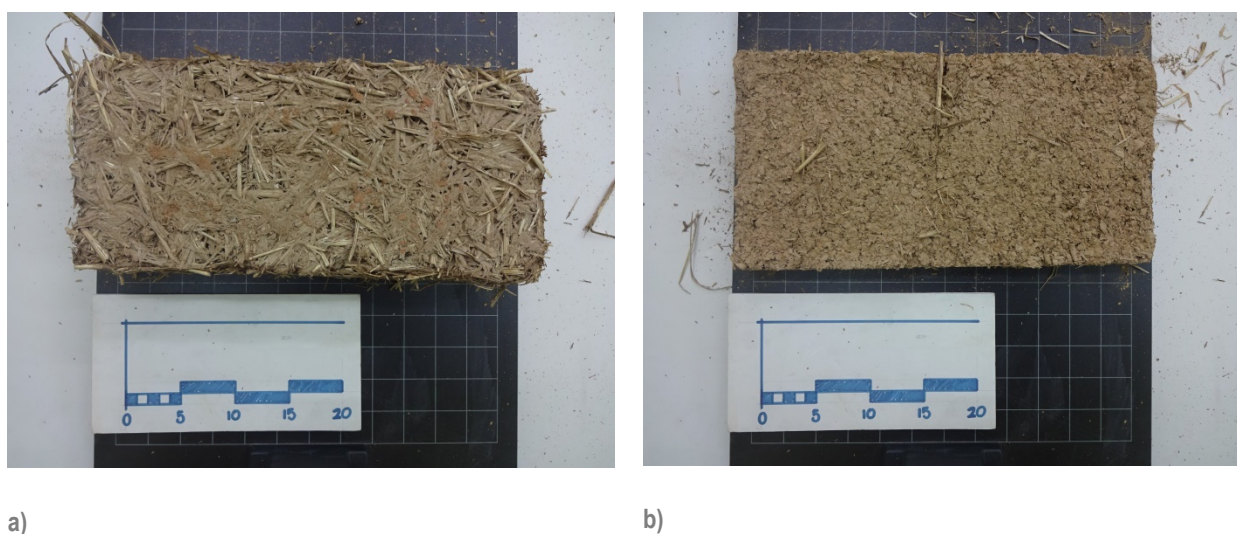


Figura 6. Paneles fabricados con diferentes espesores y fibras: a) LX.8 cm; b) LS.8 cm. Fuente: Los autores.

Ensayos térmicos

Los ensayos térmicos han sido realizados en el Laboratorio de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Valladolid (Fig. 7), siguiendo lo especificado en la norma UNE-EN ISO 8990 -Determinación de propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de caja caliente guardada y calibrada-. La caja fue instrumentalizada mediante una fuente interna de emisión de calor -bombilla de 40 W-; dos termopares colocados en cada una de las caras de la fábrica y conectados a un termómetro de medición (GAIN EXPRESS Tipo K Termoeléctrico Termómetro con 4 Sondas); un termómetro en el interior del cubo para conocer la temperatura que se

alcanza en su interior; y un termómetro externo que muestra las condiciones de laboratorio en cuanto a temperatura y humedad.

Los materiales de ensayo producidos, adobes y paneles, sirvieron para sellar una de las caras del cubo, asegurando que se cumplen las leyes termodinámicas de conducción de calor a través de los cuerpos. El secado del muro de adobe ha sido comprobado usando la cámara termográfica FLIR E8, resolución infrarroja 320 x 240 píxeles y sensibilidad térmica 0,06°C. Precisión de $\pm 2^\circ\text{C}$ o $\pm 2\%$ de la lectura, a temperatura ambiente de 10°C a 35°C y temperatura de objeto superior a 0°C.

En todos los casos ensayados se han encontrado valores de conductividad térmica apropiados. No se han encontrado diferencias entre las distintas pajas de cereal empleadas. Si se han encontrado variaciones del valor de la conductividad térmica en función de la longitud de la paja utilizada:

Larga/ long (LX), $\lambda = 0.053\text{-}0.062 \text{ W/m}^\circ\text{k}$.

Corta/ short (LS), $\lambda = 0.048\text{-}0.052 \text{ W/m}^\circ\text{k}$.



a)



b)

Figura 7. Ensayos térmicos: a) caja caliente guardada y calibrada; b) Sondas térmicas. Fuente: Los autores.

Conclusiones

Como se ha indicado, el objeto preliminar de la investigación era determinar las características y valores de conductividad térmica de diferentes paneles ejecutados con barbotina y paja de cereal, en dos longitudes diferentes, con el objeto de ser utilizado como paneles aislantes en la mejora del aislamiento térmico de edificios construidos.

Los resultados obtenidos en los ensayos muestran que los paneles alcanzan niveles de aislamiento térmico óptimos, siendo su valor independiente del tipo de paja de cereal utilizado. Se ha comprobado que la longitud de la fibra sí que tiene incidencia en la conductividad térmica, alcanzando un valor medio $\lambda = 0.057 \text{ W/m}^\circ\text{k}$ para la longitud de fibra larga (LX), y $\lambda = 0.050 \text{ W/m}^\circ\text{k}$ para la longitud de fibra corta (LS). En cualquier caso, ambos pueden ser considerados materiales aislantes ya que se considera que un material es aislante cuando alcanza valores de conductividad térmica $\lambda < 0.1 \text{ W/m}^\circ\text{k}$.

En consecuencia, es posible afirmar que los paneles aislantes fabricados con paja de cereal amalgamados con barbotina de tierra cumplen con la exigencia impuesta en CTE para ser considerados en la categoría de materiales aislantes.

De la investigación realizada se desprende que es posible fabricar paneles de aislamiento en base a tierra y fibras vegetales (Fig. 8). Este nuevo material, obtenido a partir del desecho de paja de cereal, cumple además con muchas de las exigencias de sostenibilidad medioambiental requeridas en la

edificación: reciclado y uso de materias primas de desecho, bajas emisiones de CO₂ al ambiente en su proceso de fabricación, procesos de economía circular y uso de materiales km0, entre otros. El panel de barbotina y paja de cereal puede ser considerado como una “solución constructiva adaptada”, novedosa y alineada con las estrategias de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.



Figura 8. Fibra de paja de cereal; el desecho como materia prima. Fuente: Félix Jové-Sandoval.

Referencias

Barbero-Barrero, M. Jové-Sandoval, F. González Iglesias, S. (2020). Assessment of the effect of natural hydraulic lime on the stabilisation of compressed earth blocks. *CBM, Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119877>

Cros, A. Dujardin, Rauzier, Turquin. (1980). *Thermique de la construction en terre*. Marsella: Edit. Ateliers Méditerranéens Expérimentaux.

Dethier. J. (1982). *Comportement thermique d'un mur en briques de terre crue*. París: Edit. Centre Scientifique et Technique de la Construction.

Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue. Ministère de la transition écologique et solidaire - République Française. https://www.asterre.org/media/pages/la-terre-crue/ressources-documentaires/les-guides-de-bonnes-pratiques/7806ecbbb8-1668082390/gbp_enduit_20-web.pdf

Jové-Sandoval, F. Barbero-Barrera, M. Flores-Medina, N. (2018). Assessment of the mechanical performance of three varieties of pine needles as natural reinforcement of adobe. *CBM, Construction and Building Materials*, pp. 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.187>

Jové-Sandoval, F. Barbero-Barrera, M. García-Baños, E. (2023). Influence of natural renders in compressed earth lock walls. *CITE-2023, Madrid*, pp. 240-241.

Jové-Sandoval, F. Barbero-Barrera, M. García-Baños, E. (2024). Assessment of the type of renders used on earth vernacular architecture, *CITE-2024, Madrid*, pp. 206-207

Jové-Sandoval, F. García-Baños, E. Barbero-Barrera, M. (2024). Characterisation and thermal improvement of adobe walls from earth-straw lightweight panels. *MRS Advances* 9, pp.71–77. <https://doi.org/10.1557/s43580-023-00630-1>

Ouanmini, N. Seynou, M. Remy, B. (2020): *Characterization of Peanut Shells for their Valorization in Earth Brick*. Journal of Minerals and Materials of Characterization and Engineering, 8 (04), pp. 301-315. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2020.84018>

Rocha, M. Jové-Sandoval, F. (2015). *Técnicas de construcción con tierra*. Lisboa: Ed. Argumentum

De residuo voluminoso a recurso constructivo. Reciclaje de colchones para arquitectura circular.

From bulky waste to Building Resource: Mattress Recycling for Circular Architecture.

JAVIER ARIAS MADERO/ Universidad de Valladolid

IKER DÍAZ GONZÁLEZ/ Universidad de Valladolid

Palabras clave Keywords

Economía circular 1, reciclaje de colchones 2, materiales de construcción 3, arquitectura sostenible 4, valorización de residuos 5.

Circular economy 1, Mattress recycling 2, Construction materials 3, Sustainable architecture 4, Waste valorization 5.

Resumen

RESTBUILT es un proyecto de investigación desarrollado en la Universidad de Valladolid con el apoyo del Ayuntamiento de Valladolid,, centrado en la valorización de colchones fuera de uso como materia prima para la construcción, dentro de un enfoque de economía circular. La investigación plantea una estrategia basada en el aprovechamiento integral del colchón, sin desmontaje previo, lo que permite simplificar el procesado y reducir significativamente los costes de transformación.

Tras un análisis inicial del contexto del residuo- mediante trabajo de campo, visitas técnicas se definieron las bases metodológicas del proyecto. El material fue obtenido con la colaboración de FCC Medio Ambiente y el CTR de Alicante, y se empleó en dos líneas experimentales complementarias.

La Universidad de Valladolid desarrolló prototipos de paneles térmico-acústicos a partir de triturado grueso, mientras que la Universidad de Burgos investigó el triturado fino en morteros aligerados. Esta doble aproximación permitió evaluar distintas posibilidades de aplicación.

Finalmente, se incorporó un análisis de viabilidad industrial y se promovió una estrategia activa de divulgación a través de publicaciones científicas, congresos, exposiciones y colaboraciones académicas.

Abstract

RESTBUILT is a research project developed at the University of Valladolid with the support of the Valladolid City Council, focused on the reuse of discarded mattresses as raw material for construction within a circular economy framework. The study proposes a strategy based on the integral use of the mattress, without prior disassembly, simplifying processing and significantly reducing transformation costs.

Following an initial analysis of the waste context-including fieldwork, technical visits, and the publication of the document "Recycling Mattresses for Use in Construction: State of the Art and Perspectives"-the methodological foundations were established. The material was sourced through collaboration with FCC Medio Ambiente and the Alicante Waste Treatment Center, and used in two complementary experimental lines.

The University of Valladolid developed lightweight thermal-acoustic panels using coarse shredded material, while the University of Burgos focused on lightweight mortars incorporating finer shred. This dual approach allowed for the evaluation of different applications and performance levels.

Finally, the project included an industrial feasibility study and implemented an active dissemination strategy through scientific publications, conferences, exhibitions, and academic collaborations. RESTBUILT demonstrates the technical and strategic potential of complex waste streams in sustainable architectural applications.

Introducción: El reto de los colchones como residuo.

La gestión de residuos voluminosos representa uno de los principales desafíos logísticos y ambientales en los entornos urbanos. Entre ellos, los colchones constituyen una fracción especialmente problemática por su volumen, complejidad material y baja tasa de reciclaje efectiva. Se estima que en Europa se generan anualmente más de 30 millones de unidades fuera de uso, la mayoría de las cuales acaban en vertederos o incineradoras, a pesar de contener materiales con un elevado potencial de recuperación.

Los colchones habitualmente presentan una composición híbrida —espumas de poliuretano, muelles metálicos, textiles, adhesivos y capas intermedias— que dificulta su tratamiento mecánico y la separación eficiente de sus componentes. Esta heterogeneidad, unida a la falta de canales específicos de recogida y a la escasa integración normativa de soluciones de valorización, convierte a los colchones en un residuo con alta persistencia y bajo aprovechamiento.

Desde una perspectiva de economía circular, este tipo de residuo plantea una oportunidad para explorar nuevas vías de recuperación de materiales. En particular, su aplicación en el ámbito de la construcción permite considerar la posibilidad de sustituir productos convencionales por materiales recuperados, contribuyendo así a la reducción del impacto ambiental del sector, uno de los más intensivos en consumo de recursos y generación de residuos.

Este trabajo parte de dicha hipótesis para analizar, mediante un enfoque experimental, la viabilidad técnica de incorporar componentes de colchones desechados en soluciones constructivas de bajo requerimiento estructural, como paneles aislantes, elementos de relleno o productos compuestos multicapa.



Fig.1. Colchón abandonado en la calle

Investigación inicial

El proyecto RESTBUILT parte de un doble desafío: la urgente necesidad de dar salida a uno de los residuos voluminosos más difíciles de gestionar —el colchón— y la oportunidad de reintroducir este residuo en el ciclo de vida de la arquitectura mediante soluciones constructivas sostenibles. Para afrontar este reto, la primera fase del proyecto se centró en sentar las bases conceptuales y operativas a través de un proceso de investigación inicial que combinó análisis documental, trabajo de campo, generación de alianzas y exploración técnica.

Desde los primeros compases, se estableció un **contacto activo con empresas y agentes clave** del sector: tiendas de colchones, distribuidores, centros de tratamiento de residuos y gestores medioambientales. Estas conversaciones permitieron entender el flujo real del residuo, las dinámicas de recogida, el estado en que llegan los colchones al final de su vida útil y las barreras que actualmente

difícultan su reciclaje. Esta toma de contacto directa proporcionó una visión realista sobre las posibilidades y límites del residuo como materia prima reutilizable.

En paralelo, se puso en marcha la **habilitación del espacio RESTBUILT** en la Escuela de Arquitectura de Valladolid. Este espacio físico, concebido como un laboratorio abierto, se configuró como el centro neurálgico del proyecto, permitiendo el trabajo experimental con los residuos, la construcción de prototipos, así como la divulgación de avances a la comunidad académica y técnica. La creación de este entorno experimental permitió traducir los primeros hallazgos teóricos en ensayos físicos tangibles desde una mirada arquitectónica.

Para complementar esta aproximación técnica, se llevó a cabo una **campaña de visitas a tiendas de colchones** del entorno local. A través de **entrevistas y encuestas a profesionales del sector**, se documentaron los hábitos de consumo y renovación, las políticas de recogida de usados y la escasa trazabilidad posterior del residuo. Esta información, de carácter cualitativo, aportó una capa social y comercial imprescindible al análisis, confirmando la magnitud del problema y la ausencia de alternativas reales para su valorización.

El conocimiento del contexto no podía completarse sin una **visita técnica al Centro de Tratamiento de Residuos de Valladolid (CTR)**, que permitió observar de primera mano cómo llegan los colchones a la planta, en qué estado, y cuáles son las limitaciones de su tratamiento actual. Esta experiencia resultó clave para reforzar una de las hipótesis centrales del proyecto: **la necesidad de evitar desmontajes complejos** y optar por una estrategia de trituración integral, más sencilla, económica y compatible con la realidad de los flujos de residuos.

Toda esta labor de investigación fue sistematizada en el documento técnico **“Reciclaje de colchones para su aplicación en la construcción: Estado del arte y perspectivas”**, que recoge una revisión exhaustiva de antecedentes, experiencias internacionales, patentes, usos industriales del poliuretano y otras posibilidades de valorización. Este informe no solo sintetizó el conocimiento existente, sino que permitió **delimitar el campo de acción** del proyecto y trazar una hoja de ruta coherente con los principios de sostenibilidad, circularidad y bajo impacto ambiental.

Como resultado de esta fase fundacional, se definieron las **principales líneas de investigación** que han guiado el desarrollo posterior del proyecto RESTBUILT:

- Priorizar una **estrategia sin desmontaje**, basada en el uso del colchón en su forma más íntegra posible.
- Apostar por soluciones de **mínima transformación**, que reduzcan costes y simplifiquen el proceso industrial.
- Desarrollar productos **constructivos reales y competitivos**, con aplicaciones potenciales en paneles, morteros o elementos prefabricados.
- Enfocar la investigación desde una perspectiva arquitectónica **consciente del impacto ambiental**, pero también de las oportunidades estéticas, térmicas y acústicas del material reciclado.



Fig.2. Imagen espacio RESTBUILT

Valorización de colchones/ obtención del residuo

Una vez definido el enfoque general del proyecto, la siguiente etapa consistió en abordar de manera directa la **obtención del residuo** y su transformación en materia prima válida para el desarrollo de materiales de construcción. Esta fase fue determinante para establecer las condiciones reales de trabajo del residuo colchón y definir la estrategia más eficiente y compatible con el sistema de gestión de residuos actual.

Desde el inicio, el proyecto estableció una **colaboración activa con FCC Medioambiente**, entidad responsable de la gestión del **Centro de Tratamiento de Residuos (CTR) de Alicante**, una de las instalaciones más avanzadas del país en la recepción y tratamiento de residuos voluminosos. Esta colaboración permitió acceder a colchones fuera de uso y, lo que es más importante, **comprender en detalle los condicionantes operativos del tratamiento de este residuo**: los colchones llegan en mal estado, muy contaminados, difíciles de clasificar, y con una heterogeneidad de materiales que dificulta su separación.

Lejos de considerar estos factores como obstáculos, se asumió que la clave de la valorización pasaba precisamente por **trabajar con el residuo en su estado más bruto**, sin procesos de desmontaje ni selección. Bajo esta premisa, se optó por una estrategia de trituración directa del colchón completo, una alternativa más viable a nivel económico, logístico e industrial. Esta decisión permite reducir los costes asociados a la manipulación y hacer más realista la futura aplicación del material reciclado.

Gracias al apoyo técnico del CTR de Alicante y la disposición de FCC Medioambiente, se llevó a cabo una **primera trituración gruesa del colchón completo**, obteniendo así el denominado **triturado básico**, con partículas de entre 10 y 100 mm. Este material fue clave para iniciar los ensayos experimentales en la Universidad de Valladolid, al presentar un alto nivel de heterogeneidad que reproduce fielmente la naturaleza real del residuo tal y como llega a una planta de gestión.

Este triturado, procedente de colchones sin clasificación previa, conserva todas las capas del colchón —espumas flexibles, viscoelástica, fieltros, tejidos, restos metálicos y materiales menores—, lo que lo convierte en un **residuo técnico representativo y exigente**. Trabajar con esta materia prima suponía aceptar el reto de encontrar soluciones constructivas que funcionaran sin necesidad de filtrar ni separar componentes, reforzando así el planteamiento económico y circular del proyecto.

Además de este primer triturado, parte del residuo fue sometido a una **segunda trituración fina**, con el objetivo de obtener una granulometría inferior y más homogénea, adecuada para su incorporación en mezclas técnicas como morteros o prefabricados. Esta segunda transformación, realizada con medios mecánicos adicionales, generó el denominado **triturado fino**, utilizado principalmente en los trabajos experimentales de la Universidad de Burgos.

Ambas tipologías de residuo —**triturado básico** y **triturado fino**— definen dos líneas claras de trabajo dentro del proyecto:

- Una primera, centrada en **baja transformación y mínima manipulación**, orientada a paneles por compactación o aglomeración ligera.
- Y una segunda, de **transformación técnica**, que explora formulaciones con ligantes para obtener productos con mayores prestaciones mecánicas.

Este enfoque dual permitió abordar el reciclaje del colchón no como una solución única, sino como un **abanico de posibilidades técnicas** adaptadas a distintas aplicaciones constructivas, reforzando la idea de que incluso residuos complejos pueden encontrar un lugar dentro de la arquitectura circular.



Fig.3. Centro de tratamiento de residuos Alicante

Desarrollo de prototipos

Uno de los pilares del proyecto RESTBUILT ha sido la exploración de soluciones constructivas que permitan **incorporar colchones fuera de uso como materia prima secundaria**, transformando un residuo voluminoso en un recurso técnico viable. Desde el inicio, se planteó como principio fundamental **evitar la separación manual de componentes del colchón**, y optar por su **trititación directa** como método de obtención del material base. Esta decisión responde a la necesidad de simplificar el proceso, reducir costes y acercar el modelo a la realidad operativa de los centros de tratamiento de residuos (CTR), incrementando así su viabilidad técnica e industrial.

A partir de este enfoque, el proyecto se estructuró en **dos líneas paralelas de desarrollo**, en función del tipo de triturado obtenido:

- **Línea Universidad Valladolid:** centrada en el aprovechamiento del **trititado grueso**, tal como se obtiene directamente de una primera trituración en planta. Este material, con partículas entre 10 y 100 mm, conserva en gran medida su porosidad y heterogeneidad, lo que lo hace especialmente adecuado para propuestas de **baja transformación**, como paneles térmico-acústicos, rellenos o soluciones compactadas con bajo contenido en aglutinantes. Esta línea busca un producto ligero, con comportamiento aislante y que mantenga al máximo la estructura original del residuo.
- **Línea Universidad Burgos:** orientada al tratamiento del **trititado fino**, obtenido mediante una segunda trituración más intensiva. Este residuo homogéneo, con granulometría reducida, ha sido empleado en formulaciones de **morteros aligerados y materiales compuestos**, en combinación con aglutinantes como yeso o cemento. La investigación se ha enfocado en conocer su comportamiento físico y mecánico dentro de mezclas prefabricadas, orientadas a soluciones no estructurales como placas, bloques u otros elementos modulares.

Ambas líneas comparten una misma visión: **reducir al mínimo los tratamientos del residuo para generar un producto final competitivo, sostenible y técnicamente viable**, sin renunciar a su aplicación real en el sector de la construcción.



Fig.4. Imagen de los 2 tipos de triturado

Incorporación del enfoque empresarial: caso de estudio y viabilidad del modelo

Como complemento a este desarrollo experimental, el proyecto ha incorporado un enfoque estratégico orientado a evaluar la viabilidad técnico-económica del modelo de valorización. Este análisis se ha concretado en un *business case* centrado en la transformación del residuo de colchones en paneles térmico-acústicos, con potencial de aplicación en el mercado de la rehabilitación, la arquitectura sostenible y la construcción circular.

El estudio ha validado que, bajo determinadas condiciones —uso del residuo suministrado gratuitamente por el CTR, alquiler de espacio industrial, maquinaria en renting—, el modelo puede ponerse en marcha con una inversión contenida y un retorno previsto en torno a los dos años. El análisis incluye aspectos clave como los costes de producción, la logística, la escalabilidad y los marcos normativos aplicables.

Este trabajo aporta una dimensión empresarial realista al proyecto, reforzando su carácter aplicado y su potencial de transferencia, y sentando las bases para futuras fases de industrialización. Además, demuestra que el reciclaje de colchones no es solo una posibilidad técnica, sino también una oportunidad económica alineada con los principios de sostenibilidad y economía circular.

Seguimiento y divulgación de resultados

Desde sus primeras fases, se ha apostado por una estrategia activa de divulgación y transferencia, entendiendo que el conocimiento generado debía tener un impacto real tanto en la comunidad científica como en el ámbito profesional, educativo y ciudadano. Esta voluntad de apertura ha dado lugar a una serie de acciones articuladas en diferentes formatos, desde publicaciones académicas hasta exposiciones arquitectónicas, consolidando al proyecto como un referente en la investigación sobre reciclaje de colchones para la construcción sostenible.

Uno de los hitos más relevantes ha sido la publicación en la revista científica *Sustainability* del artículo titulado "*Discarded Mattresses: From Environmental Problem to Recoverable Resource*", en el que se exponen los fundamentos del proyecto y su potencial como modelo de valorización dentro de la economía circular. Esta publicación ha permitido posicionar RESTBUILT en el panorama internacional de la investigación en materiales reciclados y arquitectura sostenible, estableciendo conexiones con iniciativas afines en Europa y América Latina.

En paralelo, se ha impulsado su propia plataforma de divulgación a través del Congreso Internacional de Arquitectura y Economía Circular, celebrado en Valladolid. Este evento ha reunido a expertos en sostenibilidad, diseño, reciclaje y políticas urbanas, y ha servido como espacio clave para compartir los avances del proyecto, abrir líneas de debate y fortalecer la comunidad investigadora en torno a la circularidad en arquitectura. El congreso se ha materializado también en el Libro de Actas, una publicación de carácter técnico-divulgativo que recoge las comunicaciones presentadas.

En el ámbito académico, la colaboración con el Máster en Arquitectura de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valladolid (ETSAVA) ha sido especialmente significativa. A través de seminarios, talleres y visitas técnicas, el proyecto ha sido integrado como caso de estudio real en la formación de arquitectos, ampliando su impacto educativo. Fruto de esta relación ha surgido también un Trabajo Fin de Grado (TFG) dedicado específicamente a la aplicación de residuos de colchones en sistemas constructivos, lo que refuerza la dimensión pedagógica e investigadora del proyecto.

Desde el punto de vista expositivo, se ha generado el montaje titulado "Refugio simbólico", una propuesta arquitectónica que ejemplifica el potencial espacial, expresivo y técnico del material reciclado. Esta pieza ha sido presentada públicamente como parte del programa de actividades del proyecto, y ha sido recogida en la publicación específica *Refugio Simbólico*, que combina reflexión teórica, documentación gráfica y resultados preliminares. Esta publicación se suma a otras como el Libro del Congreso y materiales de difusión diseñados para visibilizar el proyecto entre públicos no especializados.

Por último, RESTBUILT ha mantenido una presencia activa en redes sociales y medios digitales, tanto a través de cuentas institucionales como mediante plataformas colaborativas del ámbito arquitectónico. Esta presencia ha contribuido a ampliar la comunidad interesada en el proyecto, facilitando el intercambio de ideas, la recepción de propuestas y la creación de una red informal de apoyo e inspiración para futuros desarrollos.

En conjunto, el esfuerzo de seguimiento y divulgación ha permitido que RESTBUILT no solo avance en sus objetivos técnicos, sino que se convierta en una referencia cultural, académica y profesional sobre cómo transformar residuos problemáticos en oportunidades constructivas dentro del marco de la arquitectura circular.



Fig.5. Congreso RESTBUILT ETSAVA. Octubre 2025

Conclusión

A lo largo de sus distintas fases, la investigación ha demostrado que los colchones fuera de uso — tradicionalmente considerados un residuo voluminoso, complejo y de escasa valorización— pueden transformarse en un recurso arquitectónico viable dentro de una estrategia de economía circular. Frente a los enfoques convencionales centrados en el desmontaje y la separación de materiales, se ha adoptado una solución pragmática: aprovechar el colchón en su conjunto, sin procesos previos de separación, mediante trituración directa. Esta decisión metodológica no solo permite reducir los costes y simplificar el tratamiento del residuo, sino que facilita su integración en procesos industriales, abriendo una vía efectiva y replicable para su aplicación en soluciones constructivas sostenibles.

La caracterización del residuo y el desarrollo de prototipos se ha dividido en dos líneas complementarias: la Universidad de Valladolid ha explorado su comportamiento como material poroso, ligero y cohesionable mediante distintas matrices aglomerantes, en formatos como paneles térmico-acústicos o bloques experimentales; por su parte, la Universidad de Burgos ha trabajado con un triturado más fino, integrando el residuo en morteros aligerados, en base yeso y cemento, evaluando su potencial como árido alternativo para soluciones no estructurales.

Este enfoque dual ha permitido validar, desde distintos niveles de exigencia técnica, que el colchón triturado puede ser un componente útil, competitivo y adaptable a múltiples formatos constructivos. La incorporación de un business case, con evaluación preliminar de viabilidad y modelo de transferencia, refuerza la dimensión práctica del proyecto y sienta las bases para futuras fases de escalado, protección de resultados y posibles vías de comercialización.

Paralelamente, el esfuerzo en divulgación y transferencia de conocimiento ha sido clave para consolidarse como una referencia dentro del ámbito de la arquitectura circular. La publicación de artículos científicos, la celebración del Congreso Internacional RESTBUILT, la colaboración con programas académicos como el Máster de Arquitectura de la ETSAVA, y la exposición “Refugio simbólico” dan cuenta del compromiso del proyecto con la proyección cultural, educativa y social de la investigación.

Todo lo producido hasta ahora —desde los prototipos hasta las publicaciones, desde las alianzas técnicas hasta las experiencias docentes— constituye un punto de partida sólido para continuar explorando, afinando y aplicando los conocimientos adquiridos. Con base en esta primera fase, el proyecto se encuentra en una posición estratégica para evolucionar hacia nuevas líneas de desarrollo, consolidar sus propuestas materiales y contribuir de forma activa a una arquitectura más consciente, sostenible y circular.

Referencias

- Arias, J., & Equipo RESTBUILT. (2025). *Discarded mattresses: From environmental problem to recoverable resource*. *Sustainability*, 17(10), 12345. <https://doi.org/10.3390/su171012345>
- Arias, J. (Ed.). (2025). *Actas del Congreso Internacional de Arquitectura y Economía Circular RESTBUILT*. Valladolid: Ayuntamiento de Valladolid / Escuela de Arquitectura de Valladolid.
- Arias, J., & Col. (2024). *Reciclaje de colchones para su aplicación en la construcción: Estado del arte y perspectivas*. Fundación General de la Universidad de Valladolid.
- Arias, J. (2025). *Silencios del Arlanza: Arquitectura, paisaje y materia reciclada*. Editorial Silencios del Arlanza.
- Universidad de Valladolid. (2025). *Informe de experimentación. Paneles térmico-acústicos a partir de colchones triturados*. Proyecto RESTBUILT (No publicado).
- Universidad de Burgos. (2025). *Morteros aligerados con residuo de colchón: Informe de progreso técnico*. Grupo de Investigación en Ingeniería de la Edificación – Proyecto RESTBUILT.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC)*. Gobierno de España. <https://www.miteco.gob.es>
- European Commission. (2020). *Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe*. Brussels: European Commission. <https://eur-lex.europa.eu>
- Pérez, A., & Martín, D. (2020). *Reciclaje de residuos en materiales de construcción: estrategias para la economía circular*. Barcelona: Editorial Reverté.
- Sánchez, J., & López, M. (2022).

