

CONSTRUCCIÓN CON BALAS DE PAJA

Materiales tradicionales para respuestas actuales

Grado en Fundamentos de la Arquitectura
Trabajo final de grado

Autora: Tássia Moraes Sant'Anna
Tutor: Fernando Vegas López-Manzanares

Curso académico 2022/2023
Septiembre 2023



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA

CONSTRUCCIÓN CON BALAS DE PAJA

Materiales tradicionales para respuestas actuales

Grado en Fundamentos de la Arquitectura
Trabajo final de grado

Autora: Tássia Moraes Sant'Anna
Tutor: Fernando Vegas López-Manzanares

Curso académico 2022/2023
Septiembre 2023



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA

RESUMEN

La paja, junto con la tierra, es uno de los materiales más sencillos, ecológicos y abundantes, ya que proviene de un subproducto de la producción de cereales y está disponible en casi cualquier parte del mundo. Durante su crecimiento, la planta actúa como absorbente de CO₂ a través de la fotosíntesis, contribuyendo a reducir las emisiones de gases efecto invernadero. Su obtención requiere una cantidad mínima de energía, y su reintegración a la naturaleza no genera problemas de contaminación, lo que minimiza su impacto ambiental.

El sector de la construcción contribuye significativamente al 37% de las emisiones de carbono relacionadas con la energía a nivel mundial, con aproximadamente un 28% proveniente de las emisiones operativas (energía de uso) y un 9% de la producción de materiales y su puesta en obra (UNEP, 2022). Es por ello que, la arquitectura tradicional y el uso de materiales sostenibles, como la paja, son esenciales para contrarrestar el impacto ambiental negativo del sector de la construcción y promover un futuro más sostenible y resiliente frente al cambio climático.

En este contexto, la arquitectura tradicional, entendida como aquella que presenta técnicas constructivas que han sido desarrolladas a lo largo del tiempo en regiones o culturas específicas, y que han sido transmitidas de generación en generación adquiere gran relevancia. Ésta se caracteriza por utilizar materiales naturales, renovables y

disponibles localmente, adaptarse al entorno natural y cultural, y responder a las condiciones climáticas y necesidades funcionales de la sociedad en la que se ha desarrollado.

La construcción con balas de paja representa una opción sostenible y viable, pues los edificios construidos con este material tienen una gran durabilidad que puede exceder los 100 años, superando incluso a estructuras de hormigón armado, que se calculan para 50 años y suelen presentar daños estructurales con el tiempo. Además, los edificios de paja ofrecen una altísima eficiencia energética, reduciendo en torno al 80% la energía necesaria para calefacción y refrigeración en comparación con edificios convencionales. Esto supone un impacto significativo en la reducción del consumo energético y, por ende, en las emisiones de gases de efecto invernadero.

La transición ecológica en la construcción ya no puede ser un plan para el futuro, sino una necesidad urgente en el presente. Si no actuamos rápidamente para reducir las emisiones de acuerdo con los objetivos establecidos en el Acuerdo de París, enfrentaremos problemas aún más graves en el futuro. La urgencia de la situación es evidente y es crucial tomar medidas concretas y efectivas para abordar el cambio climático y proteger nuestro planeta, a fin de garantizar un futuro sostenible para las generaciones venideras.

Palabras clave

Balas de paja, bioconstrucción, construcción sostenible, transición ecológica, eficiencia energética.

ABSTRACT

Straw, along with soil, is one of the simplest, most ecological and most abundant materials, since it comes from a byproduct of cereal production and is available almost anywhere in the world. During its growth, the plant acts as a CO₂ absorber through photosynthesis, contributing to reducing greenhouse gas emissions. Its production requires a minimum amount of energy, and its reintegration into nature does not generate pollution problems, which minimizes its environmental impact.

The construction sector contributes significantly to 37% of global energy-related carbon emissions, with approximately 28% coming from operational emissions (energy of use) and 9% from materials production and commissioning. in work (UNEP, 2022). This is why traditional architecture and the use of sustainable materials, such as straw, are essential to counteract the negative environmental impact of the construction sector and promote a more sustainable and resilient future in the face of climate change.

In this context, traditional architecture, understood as that which presents construction techniques that have been developed over time in specific regions or cultures, and that have been transmitted from generation to generation, acquires great relevance. This is characterized by using natural, renewable and locally available materials, adapting to

the natural and cultural environment, and responding to the climatic conditions and functional needs of the society in which it has been developed.

Construction with straw bales represents a sustainable and viable option, since buildings built with this material have great durability that can exceed 100 years, even surpassing reinforced concrete structures, which are calculated for 50 years and usually present structural damage. over time. In addition, straw buildings offer very high energy efficiency, reducing the energy needed for heating and cooling by around 80% compared to conventional buildings. This has a significant impact on the reduction of energy consumption and, therefore, greenhouse gas emissions.

The ecological transition in construction can no longer be a plan for the future, but rather an urgent need in the present. If we do not act quickly to reduce emissions in line with the goals set out in the Paris Agreement, we will face even more serious problems in the future. The urgency of the situation is evident and it is crucial to take concrete and effective measures to address climate change and protect our planet, to ensure a sustainable future for generations to come.

Key words

Straw bales, ecological transition, sustainable construction, energy efficiency.

ACRÓNIMOS UTILIZADOS

CTE – Código Técnico de la Edificación

CUT – Cells Under Tension

ESBA – European Straw Building Association (Asociación Europea de Construcción con Paja)

FABSA – Fachverband Strohballenbau Deutschland (Asociación de Construcción con Fardos de Paja en Alemania)

GEI – Gases efecto invernadero

RCP – Red de Construcción con Paja

RFCP – Red Francesa de Construcción con Paja

UE – Unión Europea

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 13 |
| 1.1 Contexto y justificación..... | 13 |
| 1.2 Objetivos..... | 14 |
| 1.3 Metodología..... | 15 |
| 2. Estado de la cuestión | 16 |
| 2.1 Historia de la construcción con paja..... | 16 |
| 2.2 Transcendencia de la sostenibilidad en el escenario actual..... | 19 |
| 2.3 Impacto medioambiental de los materiales de construcción..... | 24 |
| 2.4 Relevancia de la arquitectura tradicional para alcanzar una arquitectura contemporánea sostenible..... | 28 |
| 3. La paja como material de construcción | 31 |
| 3.1 Origen y producción de la paja..... | 31 |
| 3.2 Características del material..... | 33 |
| 3.3 Ventajas y limitaciones de su uso en la construcción..... | 35 |
| 3.4 Consideraciones para garantizar durabilidad y resistencia..... | 38 |
| 3.5 Normativa reguladora internacional y nacional..... | 40 |
| 4. Técnicas constructivas con bala de paja | 45 |
| 4.1 Sistemas portantes..... | 46 |
| 4.2 Sistemas mixtos..... | 48 |
| 4.3 Técnicas de aislamiento y revestimiento..... | 57 |
| 4.4 Estudio de casos..... | 60 |
| 5. Análisis comparativo y evaluación | 70 |
| 5.1 Resumen y comparación de los sistemas constructivos abordados..... | 70 |
| 5.2 Evaluación de la sostenibilidad y eficiencia energética..... | 71 |
| 6. Conclusiones | 74 |
| 7. Referencias bibliográficas | 76 |
| 8. Listado de figuras | 80 |

“El uso de energía en edificios y para la construcción de edificios representa más de un tercio del consumo de energía final mundial y contribuye a casi una cuarta parte de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en todo el mundo”¹

¹ Traducido por la autora. El original: “Energy use in buildings and for building construction represents more than one-third of global final energy consumption and contributes to nearly one-quarter of greenhouse gases (GHG) emissions worldwide”. Global Status Report (2016). Disponible en: <https://worldgbc.org/article/global-status-report-2016/>

1.1 Contexto y justificación

“Años de advertencias sobre los impactos del cambio climático se han hecho realidad”.²

Este proyecto surge como resultado de la búsqueda personal por una vía alternativa de materializar la arquitectura: con conciencia medio ambiental y socioeconómica. Después de realizar prácticas en la Vicepresidencia Segunda y Consellería de Vivienda y Arquitectura Bioclimática, el ya existe interés por las técnicas constructivas tradicionales – originado en 2016 tras el contacto con la Permacultura y la bioconstrucción – fue nutrido con el hallazgo de la baja de paja como material constructivo, hasta entonces desconocido.

A partir de ese momento, mi involucración con esta temática se fortaleció aún más a través de la realización de prácticas en Terracota, un estudio de bioconstrucción en Valencia, donde pude participar en la elaboración de proyectos con técnicas sostenibles y conocer más sobre la ejecución de obras con paneles prefabricados de paja. Además, con la elección de este tema para el Trabajo Final de Grado, pretendo seguir en el proceso de continuo aprendizaje y acercamiento a los diversos materiales naturales y sus posibilidades de aplicación en la construcción.

Mi aspiración es profundizar cada vez más en el conocimiento y comprensión de estos materiales, explorando su potencial para lograr edificaciones más sostenibles y en armonía con el medio ambiente.

² Traducido por la autora. El original: “Years of warnings about the impacts of climate change have become a reality” Inger Andersen, Executive Director of the United Nations Environment Programme (UNEP). Disponible en: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/co2-emissions-buildings-and-construction-hit-new-high-leaving-sector>

Figura 1.1 Obra de vivienda construida con la técnica de tierra ensacada o superadobe en Florianópolis, Brasil. (Archivo personal, 2017).



Figura 1.2 Vivienda construida con superadobe, obra concluida. Florianópolis, Brasil. (Archivo personal, 2018).



1.2 Objetivos

El propósito fundamental de este trabajo es destacar el valor de la paja como material de construcción sostenible, que puede ofrecer soluciones a desafíos clave en la arquitectura relacionados con la necesidad urgente de descarbonizar el sector de la construcción para hacer frente al cambio climático.

Para ello, el trabajo se enfoca en explorar el origen de la construcción con balas de paja y sus principales características como elemento constructivo; indicar los desafíos futuros que enfrenta la industria de la construcción; identificar las distintas posibilidades de aplicación de la paja en el ámbito de la edificación y su aceptación legal en el marco normativo edificatorio, tanto internacional como nacional; reconocer su extensa utilización mediante el análisis de estudios de casos de edificios ejemplares; determinar las principales consideraciones para asegurar la durabilidad y resistencia de las obras construidas con paja; y, finalmente, destacar la sostenibilidad y la eficiencia energética de la utilización de la paja en la arquitectura.

En definitiva, este estudio busca resaltar la paja como una opción constructiva prometedora que responde a los desafíos actuales y futuros de la sostenibilidad en el sector de la construcción y su capacidad para contribuir a la lucha contra el cambio climático.

1.3 Metodología

El presente Trabajo de Fin de Grado se ha llevado a cabo mediante una investigación bibliográfica y teórica, basada en diversas fuentes especializadas en construcción con paja. Inicialmente, se ha realizado una exhaustiva consulta de libros de autores destacados en el campo y trabajos académicos de diferentes universidades, con el fin de comprender el origen de las técnicas con balas de paja, estudiando sus características clave y analizando las ventajas y desventajas de su uso como material constructivo.

Además, se investigó la regulación normativa a nivel nacional e internacional, buscando entender por qué su uso en España es limitado, a pesar de ser un material fácilmente disponible en el territorio.

Posteriormente, se investiga cómo las políticas públicas a nivel europeo están aplicando las principales cuestiones ambientales derivadas del Acuerdo de París, relacionadas con la sostenibilidad y la lucha contra el cambio climático, y cómo esto puede afectar el sector de la construcción en el futuro, basándose en informes y documentos institucionales relevantes.

A continuación, se analizaron las distintas posibilidades constructivas del uso de las balas de paja, reuniendo información sobre las principales técnicas. Una vez familiarizados con los sistemas constructivos, se enfocó en resaltar su amplia utilización mediante el análisis de tres casos de estudio, elegidos considerando el uso al cual se destinan, su calidad constructiva, su estética y composición. Este análisis se ha centrado en el estudio de los aspectos más significativos, explorando el sistema estructural y las soluciones bioclimáticas adoptadas, así como algunos detalles constructivos relevantes.

Para concluir, se recopilaron las ideas y reflexiones desarrolladas durante la elaboración del trabajo, destacando las propiedades sostenibles y ecológicas de la paja como material de construcción, con destaque para la evaluación de su eficiencia energética.

ESTADO DE LA CUESTIÓN

2

2.1 Historia de la construcción con balas de paja

El origen de las construcciones con balas de paja se remonta al surgimiento de las enfardadoras en los Estados Unidos durante el siglo XIX. Éstas convertían los residuos de la cosecha del trigo en bloques rectangulares de dimensiones compactas. En aquel tiempo, en 1872, ya se contaba con enfardadoras accionadas por fuerza animal, mientras que en 1884 surgieron las primeras enfardadoras a vapor. Estos avances tecnológicos fueron fundamentales para el desarrollo y la popularización de las casas construidas con fardos de paja.

En Nebraska, Estados Unidos, se encuentran las primeras evidencias documentadas de construcciones utilizando balas de paja. Los edificios de paja portantes más antiguas que aún están habitadas datan del período entre 1900 – 1914 y la fase de mayor propagación de esta técnica se dio entre los años 1915 y 1930 (Mahlke y Minke, 2006) (fig. 2.1). Estas

Figura 2.1 Casa Martin Monhart, Nebraska, 1925 (Mike Henry, 2012).



construcciones iniciales no contaban con estructuras de madera para soporte, y el techo se apoyaba directamente sobre los muros de paja. Con el tiempo, esta técnica de construcción de muros portantes sin estructura de madera recibió el nombre de “Sistema Nebraska”.

En el contexto europeo, la Casa Feuillette (fig 2.2 y 2.3) se destaca como un hito importante en la historia de la construcción con paja, siendo posiblemente la primera vivienda de dos plantas construida con este material. Esta notable edificación fue erigida en 1920 en Montargis, Francia. Tras ser adquirida por la Red Francesa de Construcción con Paja (RFCP), actualmente alberga al “*Centre National de la Construction en Paille Emile Feuillette*”. La edificación fue declarada monumento histórico en 2020, año de su centenario, obteniendo así protección y reconocimiento por su técnica constructiva. Su estructura de madera y relleno de paja se encuentran en excelente estado de conservación.

Desde la década de 1990, la construcción con paja experimentó un considerable aumento, especialmente impulsada por autoconstructores. Un marco significativo ocurrió en 1991 en Nuevo México, Estados Unidos, cuando se otorgaron los primeros permisos oficiales para construcciones con balas de paja que contaron con financiación bancaria (Mahlke y Minke, 2006). Este evento marcó un punto de inflexión en la aceptación y reconocimiento de la construcción con paja como una alternativa viable en el ámbito de la construcción.

A partir de ese momento, surgieron conferencias y encuentros internacionales que se dedicaron al tema de la construcción con paja, y se establecieron redes de colaboración y organizaciones, existentes hasta el día de hoy, para promover la difusión e investigación de las técnicas constructivas con balas de paja. Estos esfuerzos conjuntos han contribuido a fomentar el intercambio de conocimientos, la creación de mejores prácticas y el impulso continuo de la construcción sostenible utilizando este material renovable y eficiente.

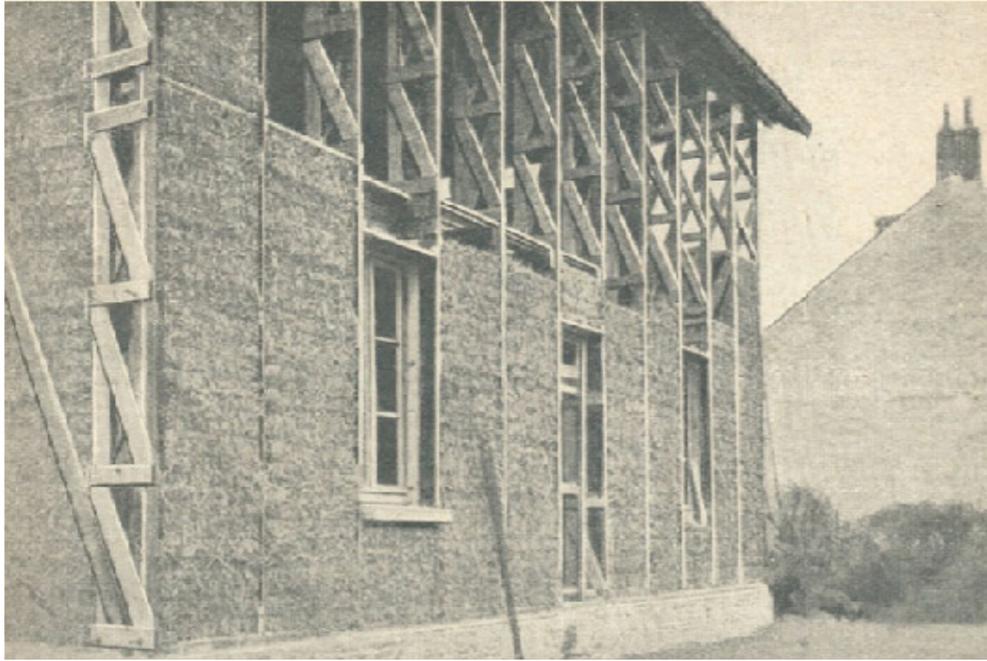


Figura 2.2 (arriba)
Casa Feuillette, Francia
(Desconocido, 1920).



Figura 2.3 (abajo)
Casa Feuillette, Francia
(Desconocido, 2014).

2.2 Trascendencia de la sostenibilidad en el escenario actual

“La neutralidad climática ya no es una cuestión de elección, es sin duda una necesidad.”³

La sociedad contemporánea enfrenta desafíos ambientales y sociales que requieren un enfoque sostenible para lograr un equilibrio entre el desarrollo económico, social y ambiental, y así satisfacer las necesidades actuales sin comprometer el bienestar de las generaciones futuras.

El aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero debido a la quema de combustibles fósiles, la deforestación y otras actividades humanas ha resultado en un incremento de las temperaturas globales y eventos climáticos extremos. Además, la explotación desmedida de recursos naturales como el agua, minerales y combustibles fósiles ha llevado a una escasez creciente de estos recursos vitales. Para garantizar su disponibilidad a largo plazo, es imperativo adoptar un uso responsable y eficiente de estos recursos.

El informe *“Global Warming of 1,5°C”* del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), publicado en 2018, alertó sobre las drásticas consecuencias que conllevaría un aumento promedio de temperatura de 2°C en comparación con un incremento de 1,5°C. Se advirtió que el colapso catastrófico del clima asociado con la diferencia entre estas dos situaciones probablemente llevaría a la total destrucción de los ecosistemas.

La construcción desempeña un papel significativo en el impacto ambiental global, al contribuir al 37% de las emisiones de carbono relacionadas con la energía a nivel mundial, con un 28% proveniente de las emisiones operativas (energía de uso) y un 9% de la producción de materiales y su puesta en obra (UNEP, 2022), por lo que resulta esencial buscar soluciones que minimicen su huella ecológica.

³ Traducido por la autora. El original: “Climate neutrality is no longer a question of choice, it is beyond doubt a necessity”. Charles Michel, European Council President, July 2020. Disponible en: <https://www.consilium.europa.eu/en/5-facts-eu-climate-neutrality/>

En la vigésima primera Conferencia de las Partes (COP21) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) celebrada en 2015, se alcanzó un logro relevante conocido como el Acuerdo de París. Este Acuerdo representa un hito en la lucha contra el cambio climático y tiene como objetivo principal limitar el aumento de la temperatura global muy por debajo de los 2°C respecto a los niveles preindustriales, aspirando a limitarlo a 1,5°C. Para alcanzar esta meta, los países signatarios se han comprometido a implementar acciones concretas y ambiciosas para reducir las emisiones de gases efecto invernadero y adaptarse a los efectos del cambio climático.

Además, el Acuerdo establece que los países deben revisar y actualizar sus compromisos de reducción de emisiones cada cinco años, lo que garantiza una evaluación periódica del progreso y posibilita la adecuación de las metas para afrontar de manera eficaz los desafíos en curso. Asimismo, los países desarrollados se comprometen a proporcionar financiación climática con el fin de ayudar a las naciones en desarrollo en sus esfuerzos por combatir el cambio climático, atenuar sus efectos, fortalecer la resiliencia y potenciar la capacidad de adaptación de estas naciones.

La actuación de los países ante el cambio climático se realiza a través de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (*Nationally Determined Contributions* o NDC, por sus siglas en inglés) o planes nacionales de acción. Estos planes contienen los objetivos específicos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y establecen las políticas y medidas que se implementarán para alcanzar dichos objetivos. Cada país tiene la autonomía para determinar su propia contribución en la lucha contra el cambio climático, tomando en cuenta sus capacidades y circunstancias nacionales particulares. De esta manera, los países asumen la responsabilidad de plantear medidas que se ajusten a sus necesidades y recursos disponibles para enfrentar el desafío de la crisis climática. Esta flexibilidad en la determinación de las NDC permite que todos los países, independientemente de su nivel de desarrollo económico, puedan tomar medidas adecuadas y acordes a su realidad nacional para cumplir con los objetivos del Acuerdo de París.

Dentro de la Unión Europea, las estrategias de lucha contra el cambio climático están enmarcadas en el Pacto Verde Europeo, que engloba un conjunto de iniciativas políticas abarcando diversos sectores como el clima, medio ambiente, energía, transporte,

industria, agricultura, entre otros. Su objetivo principal es lograr la neutralidad climática para el año 2050 y cumplir los compromisos establecidos en el Acuerdo de París. Estas políticas tienen como meta reducir las emisiones de GEI y promover la transición ecológica hacia una economía de bajas emisiones de carbono y más sostenible.

El entorno construido en la Unión Europea presenta cifras preocupantes, ya que los edificios son responsables de aproximadamente el 40% del consumo de energía y del 36% de las emisiones de CO₂ en la región. La calefacción, la refrigeración y el agua caliente sanitaria representan el 80% de la energía consumida por los ciudadanos de la UE. Para alcanzar el objetivo de cero emisiones netas de gases de efecto invernadero para 2050, es imperativo mejorar la eficiencia energética de los edificios, especialmente en lo que respecta a la reducción de las cargas de calefacción y refrigeración.

A pesar de los esfuerzos significativos a nivel global para reducir la intensidad energética de los edificios y aumentar la inversión en este sentido, el informe *Global Status Report for Building and Construction* (Naciones Unidas, 2022) muestra que el consumo total de energía y las emisiones de CO₂ del sector aumentaron por encima de los niveles previos a la pandemia en 2021. Esto se traduce en un incremento del 4% en la demanda de energía en edificios, alcanzando la mayor cifra en los últimos 10 años. Además, las emisiones de CO₂ derivadas de las operaciones de los edificios llegaron a un récord histórico de alrededor de 10 gigatoneladas de CO₂ (GtCO₂), lo que representa un aumento del 5% en comparación con 2020 y un 2% más que el pico anterior registrado en 2019.

Ante esta realidad, es imperativo abordar el comportamiento energético de los edificios, tanto los nuevos como los existentes, así como mejorar la eficiencia de los equipos consumidores de energía con el fin de lograr una descarbonización del entorno construido. La industria global de la construcción tiene un enorme potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la energía, especialmente mediante la implementación de medidas de eficiencia energética que apoyen la descarbonización del sector eléctrico. Esto implica un cambio en la manera actual de construir, donde se emplean materiales convencionales como cemento, acero y aluminio, todos con un gran impacto ambiental en términos de emisiones de CO₂ y consumo de energía durante su producción. Además, para lograr niveles de aislamiento adecuados en la construcción convencional, se requiere el uso de gruesas capas de

materiales aislantes, que en su mayoría son derivados del petróleo y de naturaleza plástica.

A día de hoy, la industria de la construcción representa casi el 40% de las emisiones globales de carbono (fig. 2.4) y es responsable del 50% de todos los materiales extraídos. El carbono incorporado en un edificio, es decir, la cantidad total de CO2 emitido durante su ciclo de vida, es una preocupación creciente. Esto incluye tanto las emisiones de carbono relacionadas con la fabricación de materiales y la construcción (carbono embebido) como las emisiones durante el uso de energía en la vida operativa del edificio (carbono operativo).

En busca de soluciones sostenibles, muchas políticas públicas se centran en la transición hacia edificios de energía cero para 2030, pero la mayoría se enfoca principalmente en reducir el carbono operativo, es decir, las emisiones generadas durante la vida operativa del edificio.

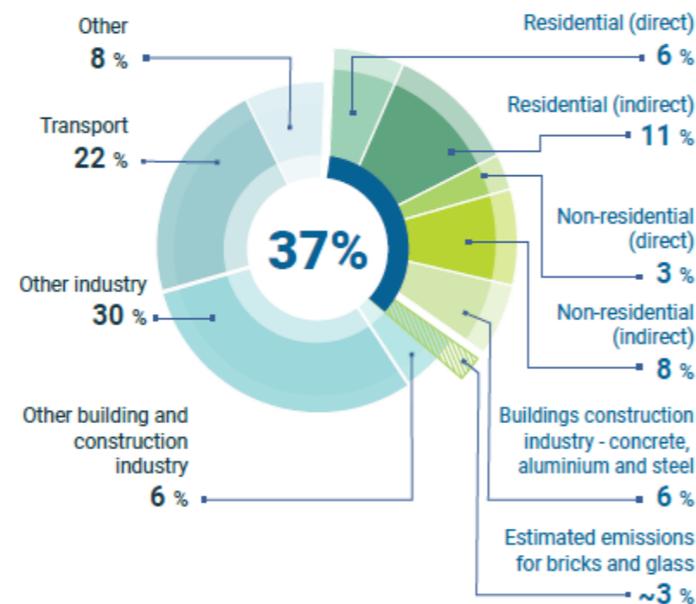
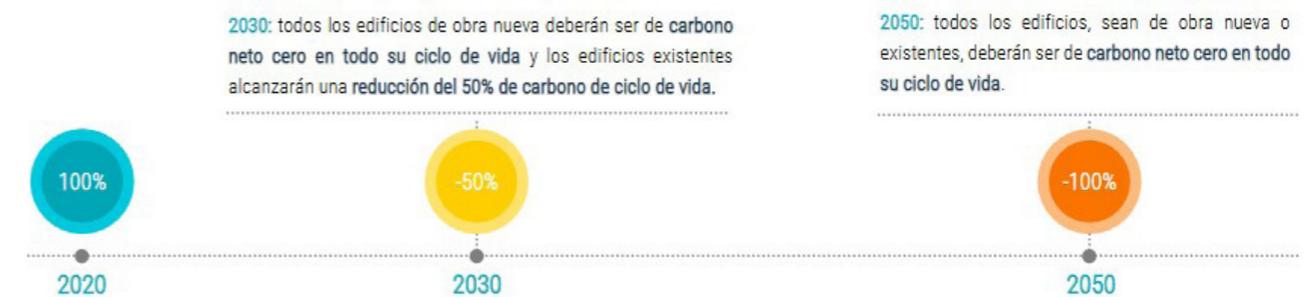


Figura 2.4 Participación de los edificios en las emisiones globales de energía y procesos en 2021. (Global Status Report, 2022).

El World Green Building Council España (2022) ha propuesto que todos los edificios de obra nueva deberán ser carbono cero en todo su ciclo de vida, y que los edificios existentes deberán lograr una reducción del 50% en sus emisiones de carbono a lo largo del ciclo de vida (fig. 2.5).

Para lograr el objetivo de carbono cero y reducir las emisiones en toda la cadena de suministro de la construcción, es esencial considerar también el carbono correspondiente a la elección de materiales y en el rendimiento general del edificio. El análisis del ciclo de vida, que evalúa los impactos del carbono a lo largo de todo el ciclo de vida del edificio, incluido el carbono incorporado, es una herramienta compleja pero esencial en este proceso.



A pesar de algunos avances, es necesario acelerar las acciones en el sector de la construcción para enfrentar la urgencia del desafío. Se requieren medidas políticas, tecnológicas y financieras que fomenten la sostenibilidad y aceleren los esfuerzos en todas las regiones. Para lograr un futuro próspero y equitativo para las generaciones venideras, es esencial un enfoque integral y un compromiso colectivo hacia la sostenibilidad, en el que individuos y organizaciones trabajen juntos para preservar los recursos naturales y mitigar el cambio climático.

La transición hacia la descarbonización debe considerarse como una oportunidad de crecimiento para la industria de la construcción y especialmente para las empresas de materiales. En realidad, la sostenibilidad no actúa como una barrera para el avance tecnológico; por el contrario, brinda una plataforma para la investigación y desarrollo de nuevos materiales, como los biocompuestos, así como para la implementación de procesos que incorporen la visión de la circularidad en los materiales, a través de nuevas herramientas como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) o el Pasaporte de Materiales, que permiten cuantificar los materiales reutilizables en los edificios.

Figura 2.5 Transformación progresiva del sector para alcanzar la completa descarbonización del parque edificado en 2050 (WorldGBC, 2022).

2.3 Impacto medioambiental de los materiales de construcción

Estamos acostumbrados a un modelo económico lineal que involucra la extracción de materias primas, la producción y el descarte, sin considerar las repercusiones ambientales, y generando una cantidad considerable de residuos. No obstante, en el siglo XXI se debe llevar a cabo una transición hacia un modelo económico circular, donde los desechos sean vistos como recursos y se reintegren al ciclo productivo, creando así una cadena de producción cerrada que salvaguarde los recursos limitados del planeta (fig. 2.6).

El sector de la construcción es responsable por extraer aproximadamente el 50% de las materias primas de la litosfera (*European Union, 2022*) y de generar alrededor de 100.000 millones de toneladas de residuos, que abarcan construcción, renovación y demolición. Lamentablemente, cerca del 35% de estos residuos terminan en vertederos (Chen et al. 2022, citado en UNEP, 2022). En los próximos años, se prevé que el consumo global de materias primas casi se duplicará para el año 2060 impulsado por la expansión de la economía mundial y la mejora en los estándares de vida. Gran parte de este aumento se observará en economías en desarrollo y en rápido crecimiento, donde el consumo de materiales de construcción tendrá un impacto predominante en el uso de recursos, con el consecuente aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas (WGBC, 2022).

Adicionalmente, la producción de cemento representa cerca del 7% de las emisiones globales de CO₂ (*International Energy Agency, 2018, citado en WorldGBC, 2022*), mientras que la producción de acero contribuye entre un 7% y un 9% del total de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial (*Stockholm Environment Institute, 2018, citado en WorldGBC, 2022*). La energía requerida para la fabricación y el transporte de estos materiales, así como para la construcción en sí misma, incide directamente en las emisiones de carbono.

Desde la extracción de materias primas hasta la fase de demolición, cada etapa del ciclo de vida de un edificio puede generar emisiones de gases de efecto invernadero, agotar recursos naturales, generar residuos y afectar la calidad del aire y el agua. Comprender

y abordar estos impactos se ha vuelto crucial para avanzar hacia una construcción más sostenible y consciente, donde la elección de materiales, los métodos constructivos y la gestión de residuos desempeñen un papel fundamental en la mitigación de los desafíos medioambientales que enfrentamos en la actualidad.

El Pasaporte de Materiales del Edificio es un documento de identificación, registro y evaluación de los materiales y productos utilizados en una construcción. Su propósito es cuantificar y ubicar en el espacio construido todos los elementos empleados, permitiendo su correcta reutilización al momento de su descarte y fomentando así una circulación continua de materiales. Este instrumento también tiene la finalidad de medir el impacto ambiental de los materiales utilizados, apoyándose en cuatro principios fundamentales de la construcción circular: toxicidad, circularidad, valor residual y productividad. Estos aspectos abarcan cuestiones no contempladas por otros documentos o certificaciones y se centran especialmente en la idea de circularidad, incorporando elementos como el diseño para el desmontaje, y ofreciendo incluso la posibilidad de proporcionar información relacionada con el rendimiento energético. Bajo esta perspectiva, los edificios se transforman en bancos de materiales, en los cuales los materiales dejan de ser futuros residuos y se transforman en recursos que pueden ser reutilizados en ciclos de vida posteriores, y de forma indefinida.

A pesar de la ausencia actual de regulaciones específicas a nivel europeo o nacional que establezcan la obligatoriedad de un Pasaporte de Materiales del Edificio, en España está prevista la obligatoriedad de registros digitales de los materiales utilizados en nuevas obras de construcción a partir del 1 de enero de 2024. Este avance hacia la digitalización y evaluación ambiental de los materiales de construcción conlleva una mayor transparencia y trazabilidad en la cadena de suministro de la construcción. Con ello, tanto los profesionales del sector, como los propietarios y consumidores podrán tomar decisiones informadas y conscientes basadas en datos cuantificables y objetivos sobre los materiales incorporados en sus proyectos. Esta nueva perspectiva impulsa un cambio positivo y una toma de decisiones más consciente en la manera en que diseñamos, edificamos y gestionamos nuestros edificios.

El Centro de Arquitectura Industrializada (CINAK) de la Real Academia Danesa ha

desarrollado la Pirámide de Materiales de Construcción (fig. 2.7), una herramienta digital que permite visualizar el impacto ambiental asociado de los materiales de construcción. Este instrumento permite visualizar el impacto ambiental entre diferentes categorías de materiales o incluso dentro de una misma categoría. Además de facilitar la comparación de diversos indicadores del impacto ambiental, como el potencial de calentamiento global (GWP), el potencial de agotamiento de ozono (ODP), la formación de ozono troposférico (POCP), el potencial de acidificación (AP) y el potencial de eutrofización (EP), esta evaluación se basa en las Declaraciones Ambientales de Producto (EPD) que proporcionan información detallada sobre los posibles impactos ambientales del material a través del análisis estandarizado de su Ciclo de Vida. Es importante resaltar que esta herramienta se concentra principalmente en las etapas iniciales de la producción, que engloban desde la extracción de la materia prima hasta la fabricación del producto.

La adopción de prácticas de construcción sostenible ha alcanzado un nivel de importancia crítico en la mitigación del impacto ambiental negativo de los materiales de construcción. Entre estas prácticas, resaltan el uso de materiales de bajo impacto ambiental, la promoción de la eficiencia energética en los edificios y la implementación de estrategias de reutilización y reciclaje de materiales. La elección de materiales de bajo impacto ambiental implica la preferencia por aquellos que conllevan un menor consumo energético y generan menos emisiones de gases de efecto invernadero durante su proceso de fabricación. Por su parte, la eficiencia energética en la construcción se refiere al diseño y establecimiento de edificios que demandan una menor cantidad de energía en sus operaciones, ya sea para la calefacción, refrigeración o iluminación.

Además, el enfoque hacia una economía circular en la industria de la construcción (fig. 2.7) desempeña un papel fundamental en la reducción de la cantidad de materia prima extraída y de residuos producidos por el sector. Al reconocer desde las etapas iniciales del proceso de diseño tanto la importancia del carbono embebido en los edificios como el impacto ambiental de los materiales de construcción, podríamos avanzar hacia un futuro en el que la construcción y el diseño se alineen con los objetivos fijados por el Acuerdo de París. Este sería un paso crucial en la dirección de un entorno construido más sostenible y en armonía con el planeta, promoviendo la coherencia entre la actividad humana y la preservación de los recursos naturales.

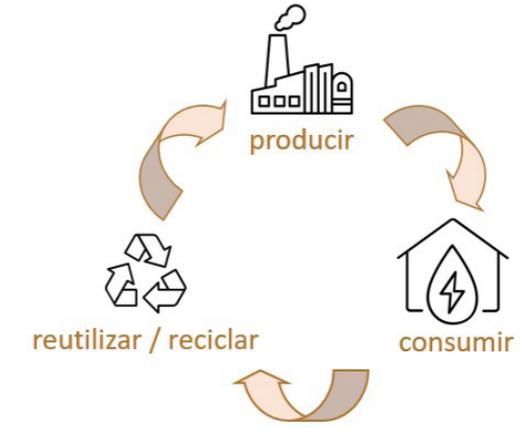


Figura 2.6 Enfoque de una economía circular (elaboración propia).



Figura 2.7 Pirámide de los materiales de construcción (medida en potencial de calentamiento global) (Real Academia Danesa, 2019).

2.4 Relevancia de la arquitectura tradicional para alcanzar una arquitectura contemporánea sostenible

“[...] las riquezas insondables de la arquitectura vernácula, valiosa fuente de inspiración para una arquitectura contemporánea respetuosa con el medioambiente, en una amplia diversidad de contextos sociales, físicos, culturales y económicos.”⁴

Aunque el término “sostenible” haya adquirido un estatus común en numerosos proyectos, su utilización en la arquitectura contemporánea a menudo puede generar la impresión de que esta arquitectura enfocada en certificados energéticos y sellos de construcción verde está guiando la arquitectura hacia la sostenibilidad, redefiniendo así el camino que debería seguir. Sin embargo, “la historia de la arquitectura nos dice que la arquitectura ha sido sostenible desde su nacimiento y que desde su mismo origen ha satisfecho muchas de las necesidades que hoy ya no se satisfacen, por otras prioridades del mundo global, por lo que recurrimos a la tecnología en un intento de proporcionar un contrapeso” (Vegas et al., 2014, p. 35)⁵.

En ese sentido, la arquitectura tradicional, también conocida como arquitectura vernácula, abarca las técnicas constructivas que se han desarrollado a lo largo del tiempo en una región específica, adaptándose a las condiciones climáticas, topográficas, geográficas, culturales y materiales disponibles en ese entorno particular. Esta forma de construcción surge de la sabiduría transmitida por generaciones pasadas y ha sido moldeada por las nuevas necesidades prácticas y culturales de la comunidad.

A pesar de su relevancia, los saberes vernáculos en la construcción se han limitado en su mayoría a la preservación patrimonial o a referencias nostálgicas al pasado (Hu, 2023).

⁴VerSus: lecciones del patrimonio vernáculo para una arquitectura sostenible. Edición CRAterre / ESG / UNICA / UNIFI / UPV, (p.11). Abril, 2014.

⁵ Traducido por la autora. El original: “However, the history of architecture tells us that architecture has been sustainable from birth and that since its very origin it has satisfied many of the needs that today are no longer met, due to other priorities of the global world, as a result of which we resort to technology in an attempt to provide a counterbalance.” Disponible en VerSus: *Heritage for Tomorrow: vernacular Knowledge for Sustainable Architecture* (2014).

Como resultado, los métodos de la arquitectura tradicional son a menudo subestimados y rara vez se aplican en prácticas de construcción sostenible modernas. En ese sentido, el patrimonio vernáculo constituye una valiosa fuente de conocimiento que puede brindar principios fundamentales para guiar el diseño de una nueva arquitectura contemporánea sostenible (Correia et al., 2014).

Numerosos estudios resaltan la importancia de aprender de la arquitectura tradicional para auxiliar la creación de edificios contemporáneos sostenibles y de retornar a los enfoques locales, más adecuados para sus entornos específicos.

Según Dabaieh (2022), tanto las estrategias de diseño de la arquitectura vernácula como los principios de la economía circular comparten conceptos esenciales. La arquitectura tradicional se preocupa por edificaciones climáticamente sensibles, utilizando materiales y tecnología locales que reflejan las costumbres y el estilo de vida de la comunidad. Mediante la aplicación de conceptos vernáculos, es posible concebir diseños conscientes del entorno que respondan a las condiciones climáticas, generalmente empleando estrategias pasivas y de bajo consumo energético para garantizar el confort humano. De esa manera, inspirarse en la arquitectura vernácula puede reducir de manera significativa el impacto ambiental negativo de los edificios y el uso excesivo de recursos naturales.

Según Hu (2023), las lecciones vernáculos provienen de la interacción integral y dinámica entre los hábitats humanos y los ecosistemas, permitiéndoles adaptarse a los cambios en el entorno. Además, las técnicas de construcción vernáculos se basan en el clima local y los recursos naturales, moldeando así la concepción de las estructuras arquitectónicas. Asimismo, la reducida necesidad de transporte contribuye significativamente a la reducción de las emisiones de carbono, y también el hecho de que la mayoría de los materiales vernáculos son de origen orgánico, biodegradables, renovables y poseen la capacidad de almacenar carbono. Por último, el uso de la artesanía y la mano de obra local genera un impacto positivo en la economía local, especialmente en comunidades más económicamente vulnerables.

La incorporación del saber de la construcción vernácula en los planes de resiliencia climática implica, según Hu (2023), dos elementos esenciales: el aumento de la sensibilización pública respecto a los beneficios de la arquitectura vernácula y de

LA PAJA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

3

otros materiales (en lugar de la madera); y la realización de ensayos y experimentos respaldados por bases científicas, destinados a cerrar la brecha entre el conocimiento vernáculo y las prácticas modernas. Tal proceso podrá conducir a soluciones optimizadas que se adapten a las demandas de desarrollo sostenible de las comunidades locales, al mismo tiempo que preservan el entorno ambiental circundante. Además, incide que es de suma importancia reconocer que la construcción con madera, o materiales basados en madera, por sí sola no constituirá una solución sostenible universalmente aplicable para todos los países, regiones y comunidades.

Algunos materiales de la arquitectura tradicional.

Figura 2.8 Ladrillos de adobe (Julien Harneis, 2015).

Figura 2.9 Bambú (Depositphotos, sin fecha).

Figura 2.10 Muro de piedra (archivo personal, 2023).



3.1 Origen y producción de la paja

Desde hace mucho tiempo, la paja ha sido utilizada en la construcción, tanto para la ejecución de techados, ya que proporciona una mayor durabilidad, como en la mejora del aislamiento térmico y de la reducción de las grietas que pueden surgir durante el proceso de secado en construcciones de barro, como el adobe.

La paja es un material vegetal que se obtiene de los tallos secos de cereales como el trigo, la cebada, el arroz o el centeno. Es un subproducto de la agricultura que tiene como características ser ligero, de bajo coste, renovable y biodegradable, lo que la convierte en una opción sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

La producción agrícola de cereales en el mundo es esencial para abastecer la demanda de alimentos, piensos animales, materias primas para la industria alimentaria y otros usos. Estos cultivos son ampliamente labrados en diferentes regiones del mundo y desempeñan un papel crucial en la seguridad alimentaria global.

La producción de cereales está sujeta a variaciones anuales debido a factores como las condiciones climáticas, la disponibilidad de tierras agrícolas, la tecnología agrícola y la demanda del mercado. Según los datos más recientes de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), en 2020, la producción mundial de cultivos primarios alcanzó los 9,3 mil millones de toneladas, 52% más que en 2000 (fig 3.1).

PRIMARY CROP PRODUCTION



2000



2020

AROUND
+52%

9.3
BILLION
TONNES

The production of primary crops was 9.3 billion tonnes in 2020, 52% more than in 2000.

GLOBAL PRIMARY CROP PRODUCTION



Four crops account for about half of global primary crop production: sugar cane, maize, wheat and rice.

Figura 3.1 (izq.) Incremento de la producción de cultivos primarios (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2022).

Figura 3.2 (der.) Principales cultivos primarios producidos a nivel global (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2022).

A nivel mundial, los cultivos primarios más producidos incluyen la caña de azúcar, el maíz, el trigo y el arroz, los cuales representan aproximadamente la mitad de la producción total de cultivos primarios (fig 3.2). Los mayores productores de cereales son China, Estados Unidos, India, Rusia y Brasil. Estos países tienen extensas áreas de cultivo y una gran capacidad de producción. Sin embargo, la producción de cereales también es significativa en otras partes del mundo, como la Unión Europea, Canadá, Australia, Argentina y otros países que contribuyen de manera importante a la producción global de cereales.

No obstante, es importante destacar que cuando no se destina adecuadamente, parte de esta materia prima puede terminar siendo desperdiciada y generar un impacto ambiental significativo. Por ejemplo, después de la cosecha, una práctica recurrente para eliminar el exceso de la paja es quemarla, lo que conlleva una considerable contaminación ambiental. Lo ideal sería adoptar medidas para evitar este tipo de desperdicio y promover prácticas sostenibles que aprovechen al máximo estos residuos transformándolos en recursos, adoptando un modelo de economía circular que minimice su impacto negativo en el medio ambiente y evite la extracción y producción innecesaria de recursos naturales.

3.2 Características del material

Para la utilización en la construcción, se recomienda principalmente el uso de paja de trigo, escanda, arroz y centeno, ya que son consideradas más estables y convenientes (Minke, 2006).

En la selección de la paja para su uso en construcción, es fundamental prestar atención a tres características clave: la densidad, la humedad y la orientación de las fibras. La densidad de las balas debe situarse dentro del rango de 80 a 120 Kg/m³, siendo el ideal entre 100 - 115 Kg/m³.

Para medir la humedad de los fardos, se emplea un medidor específico para este material, con una sonda lo suficientemente larga para alcanzar el centro del fardo. Es importante asegurarse de que el contenido máximo de agua en la paja empacada no supere el 20%, ya que su utilización con niveles de humedad superiores se desaconseja (RFCP, 2012). Mantener el índice de humedad dentro de este límite garantiza una mejor durabilidad de la paja en aplicaciones constructivas, puesto que con valores de humedades altos las hierbas se pudren más rápido.

Las dimensiones y formas de los fardos de paja pueden ser muy diversas, ya que dependen del diseño del canal de la prensa utilizada para su producción. En el ámbito de la construcción, se prefieren generalmente los fardos rectangulares y de tamaño reducido, lo que permite que un solo trabajador pueda manejarlos fácilmente, ya que el peso estándar de una bala de paja suele rondar los 25 kg. Las dimensiones más comunes son de 50 a 120 cm de largo, 35 a 37 cm de altura y 45 a 47 cm de anchura (RFCP, 2012). Según Minke (2006), la capacidad portante de un muro de balas de paja puede llegar a más de 500 kg/m, lo equivalente a 1000 kg/m².

En cuanto a la dirección de las fibras, estas suelen ubicarse mayormente en la dirección transversal (anchura). Es importante tener en cuenta que la conductividad térmica de una bala de paja puede variar según la dirección de las fibras, pudiendo variar entre 0,046 o 0,082 W/(m·K) según la posición en que es colocada (ESBA, 2021). Respecto a su capacidad aislante, se puede decir que es equivalente a un aislamiento de lana de roca de cerca de 28 cm.

En los sistemas constructivos más actuales, donde se integra la industrialización, se producen paneles prefabricados de madera y paja, que serán abordados más adelante. En estos casos, las balas de paja son descompuestas y luego se comprimen nuevamente dentro de los bastidores de madera, con una presión mínima de 120 Kg/m³. El espesor de estos paneles puede ser de 25 o 35 cm, proporcionando que el grosor del muro se adapte según la necesidad de proyecto.

Respecto a las características técnicas, las principales propiedades físicas de las balas de paja recogidas en el capítulo 3 del “*Straw Bale Building Guidelines*” [Directrices para la Construcción con Balas de Paja] (FASBA, 2020) son:

- clase de resistencia al fuego: F-30B (con revoco de arcilla de 8 mm); F-90B (con revoco de cal de 10 mm)
- conductividad térmica (λ): 0,048 W/(m·K) (valor válido en toda la UE)
- transmitancia térmica (U): 0,155 W/(m²·K)
- capacidad calorífica específica (c)⁶: 2,0 kJ/(kg·K)
- aislamiento acústico: $R_{w,R} = 43$ dB (para un muro con enlucido de 1 cm de espesor, 36 cm de paja, postes de 6 cm/30 cm con placa de aislamiento de fibra de madera de 2 cm como soporte de la capa de enlucido, en cada cara)
- coeficiente de resistencia a la difusión del vapor de agua (μ): 2

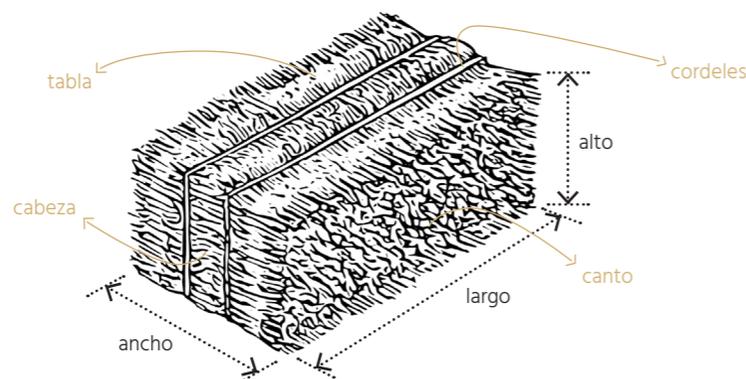


Figura 3.3 Dimensiones y caras de una bala de paja (elaboración propia).

⁶ la capacidad calorífica específica de un material denota la energía que se requiere para calentar un kilogramo del material por un grado kelvin. En este caso, se refiere a la capacidad calorífica específica de la paja de cereal típica.

3.3 Ventajas y limitaciones de su uso en la construcción

Las edificaciones construidas con balas de paja ofrecen importantes ventajas, entre las cuales destaca su espectacular capacidad de aislamiento térmico. Esto permite mantener un ambiente interior agradable, tanto en épocas de frío como de calor en el exterior, lo que se traduce en un significativo ahorro económico en refrigeración y calefacción. Según la Red de Construcción con Paja de España, es un material seis veces más aislante que cualquier otro que exige el Código Técnico de la Edificación español.

Además de su eficiencia energética – a menudo mal entendida como el único aspecto relevante en las construcciones “sostenibles” en la actualidad –, la paja ofrece una verdadera ventaja desde la perspectiva de la sostenibilidad: es un material con una huella de carbono negativa, lo que significa que durante su ciclo vegetal absorbe más CO₂ de lo que emite durante su proceso de producción. Esto contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y su impacto en el cambio climático.

En ese sentido, la construcción con balas de paja ofrece otras ventajas notables:

- Es considerada una obra seca, lo que reduce el consumo de agua en la construcción.
- Proporciona ambientes interiores saludables con aire de calidad, libre de sustancias nocivas (COVs)⁷.
- Los edificios construidos con paja tienen una gran transpirabilidad en sus

⁷ Los compuestos orgánicos volátiles (COVs) son sustancias químicas que contienen carbono y se evaporan fácilmente a temperatura ambiente, liberando vapores al aire. Estos compuestos se encuentran en muchos productos y materiales, como pinturas, barnices, productos de limpieza, combustibles, productos de cuidado personal y algunos materiales de construcción.

Los COVs pueden presentar riesgos tanto medioambiental, como para la salud humana. Algunos COVs tienen un impacto negativo en la capa de ozono, contribuyendo a su disminución. Los efectos adversos para la salud incluyen problemas respiratorios, irritación de los ojos y la garganta, mareos y otros síntomas. Además, pueden afectar negativamente la salud mental, causando irritabilidad y dificultades de concentración, entre otros efectos psiquiátricos. A largo plazo, los COVs pueden causar daños en órganos como los riñones, el hígado y el sistema nervioso central. Algunos COVs también son carcinógenos, como el benceno.

Por tanto, es fundamental minimizar la exposición a estos compuestos y utilizar productos y materiales con bajos niveles de COVs para proteger tanto nuestra salud como el medio ambiente. (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico)

cerramientos, permitiendo que “respiren” y tengan una alta difusión del vapor de agua, lo que reduce la ocurrencia de condensaciones superficiales y/o internas.

- La paja combinada con materiales como la madera, la arcilla o la cal, posee una gran capacidad higroscópica, regulando la humedad interior del edificio.
- Es un material sostenible que requiere una mínima energía para su obtención.
- Al llegar al final de su vida útil, la paja tiene un mínimo impacto ambiental, ya que no solo ha absorbido CO2 durante su ciclo vegetal, sino que también es biodegradable y genera escasos residuos, pudiendo ser devuelta a la naturaleza.

Además de su versatilidad y facilidad de uso, la paja es un recurso natural abundante y sostenible. Cada año, aproximadamente el 20% de la paja cosechada en Alemania no se utiliza, lo que representa un potencial para construir alrededor de 350.000 viviendas unifamiliares (FABSA, 2019). Este material es un claro ejemplo de cómo se puede integrar en la economía circular al ser reutilizado y reciclado en diversas aplicaciones. También, para cada tonelada de paja producida, equivale a una tonelada y media de CO2 capturado de la atmósfera.

En lugar de considerar la paja como un residuo agrícola desechable, se pueden explorar diferentes formas de aprovecharla en la producción de materiales de construcción sostenibles. Por ejemplo, la paja puede servir como material de relleno en paneles de construcción, brindando resistencia y aislamiento térmico y acústico. También puede ser utilizada como base para fabricar productos como tableros de fibra de paja, ampliando sus posibilidades de uso en la industria de la construcción.

Al aplicar la economía circular en este contexto, se logra prolongar la vida útil de la paja y maximizar su valor, evitando la necesidad de utilizar recursos vírgenes y reduciendo la generación de residuos. Esto, a su vez, contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y promueve una construcción más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

En resumen, la construcción con balas de paja es una opción altamente favorable para promover la sostenibilidad, la economía circular y reducir el impacto ambiental en el

sector de la construcción.

Por otro lado, aunque la construcción con paja ofrece numerosas ventajas, también presenta algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta:

- Resistencia al agua: La paja es vulnerable a la humedad y no es adecuada para ser expuesta a condiciones de alta humedad o lluvias frecuentes, ya que puede descomponerse y perder su integridad estructural.
- Cumplimiento normativo: En algunos lugares, las regulaciones de construcción pueden no considerar a la paja como un material de construcción convencional, lo que podría limitar su uso o requerir trámites adicionales para obtener permisos.
- Compatibilidad con otros materiales: Es esencial utilizar técnicas y materiales compatibles con la paja para garantizar la durabilidad y la resistencia de la construcción.
- Riesgo de incendios: La paja suelta es altamente inflamable. No obstante, en las construcciones donde la paja está comprimida y adecuadamente revestida, se vuelve mucho más resistente al fuego que otros materiales. Esto se debe a que, al estar compactada dentro de una bala de paja, hay una falta de oxígeno que reduce la propagación del fuego y mejora su resistencia ante esta amenaza.
- Limitaciones en la altura de construcción: Las edificaciones construidas con sistemas de paja portante suelen tener limitaciones en la altura debido a la resistencia y estabilidad del material, lo que podría restringir el uso de la paja estructural para edificios de varias plantas.

A pesar de las limitaciones mencionadas, la construcción con paja sigue siendo una opción atractiva y sostenible. Con una adecuada planificación y cuidados durante la ejecución, es posible minimizar los riesgos asociados a su uso y garantizar la durabilidad de la edificación. La clave para aprovechar al máximo las ventajas de este material radica en seguir prácticas constructivas bien fundamentadas y contar con profesionales capacitados que implementen las mejores técnicas para obtener resultados seguros y duraderos.

3.4 Consideraciones para garantizar durabilidad y resistencia

Una de las principales preocupaciones en las construcciones con balas de paja es la protección contra la humedad. Es esencial evitar cualquier contacto directo con el suelo para prevenir la absorción de humedad desde la tierra por capilaridad. Por esta razón, la sobrecimentación debe tener, como mínimo, 40 cm y se debe colocar una lámina impermeable entre ésta y el marco inferior de madera, sobre el cual se apoyarán las balas de paja.

Además, es crucial proteger los muros de las lluvias directas y las salpicaduras desde el suelo, ya que esto puede degradar la estructura y propiciar el crecimiento de hongos. Por lo tanto, los aleros deben tener al menos 50 cm de proyección. En esencia, los muros de paja necesitan una "buena base y un buen sombrero". Si durante la construcción aún no se ha instalado la cubierta, los muros deben ser adecuadamente resguardados con una lámina protectora.

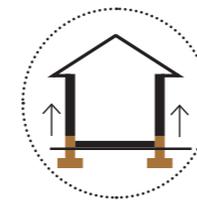
La aplicación del revoco debe ser realizada con meticulosidad para que penetre en la paja y forme una superficie uniforme, asegurando así su protección efectiva desde el exterior. Cuando se produzcan cambios de material, es necesario incorporar una malla de revoco, tela de saco o cañizo para garantizar una superficie que facilite la adherencia del mortero y prevenga el surgimiento de grietas en las juntas. En los muros de carga, la aparición de grietas también puede estar relacionada con el revoco aplicado antes de que los muros estén completamente comprimidos.

Cabe resaltar que, para mantener la transpirabilidad del muro de paja, el revoco exterior debe ser elaborado con cal, ya que esto preserva la capacidad del muro para permitir la difusión adecuada del vapor de agua, evitando la acumulación de condensación en su interior.

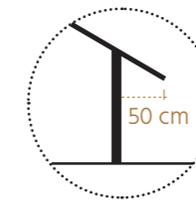
Otro aspecto importante para asegurar el éxito de la obra es la protección contra incendios. Las balas de paja compactadas no se incendian debido a la falta de oxígeno en su interior. Sin embargo, la paja suelta que puede quedar en el suelo durante la fase de ejecución es altamente inflamable. Por esta razón, los constructores deben mantener un

lugar limpio, evitar actividades generadoras de calor o chispas, implementar medidas de protección contra incendios provocados y disponer de un suministro de agua en el lugar para extinguir cualquier incendio rápidamente. También se pueden utilizar retardantes de fuego comerciales para una mayor seguridad, o una solución más ecológica sería la mezcla de bórax y ácido bórico, que además combate las infestaciones de hongos e insectos.

Finalmente, un mantenimiento regular y adecuado, que incluya inspecciones periódicas para detectar y reparar posibles filtraciones de agua en los muros, resulta esencial para asegurar la durabilidad y la seguridad de las construcciones con balas de paja a lo largo del tiempo.



sobrecimentación elevada



alero pronunciado
(o revestimiento apto para exterior)



revocado de los muros y limpieza
de la obra para protección frente
a incendios



protección contra la humedad,
atención con las juntas

3.5 Normativa reguladora internacional y nacional

A pesar de que las primeras construcciones con paja ya existen hace más de 100 años, y que la expansión y difusión de la construcción con este material haya llegado a muchos países, en la actualidad, los países que cuentan con marcos normativos específicos para la construcción con balas de paja son Estados Unidos, Canadá, Bielorrusia, Alemania y Austria (RCP, 2015). En estos países, las normas técnicas relacionadas con la construcción con paja están integradas en sus respectivos códigos técnicos.

Estados Unidos ha sido un pionero en la construcción con balas de paja y en su regulación. El *International Residential Code* (IRC) [Código Residencial Internacional] estadounidense es la base del Código de Construcción Residencial en la mayoría de las jurisdicciones del país. En 2015, se incluyó un apéndice en este código que establece “requisitos prescriptivos y basados en el desempeño para el uso de fardos de paja como material de construcción” (IRC, 2015). Las normas estadounidenses establecen el contenido máximo de humedad permitido en las balas de paja, el ancho mínimo de los muros, la carga máxima admitida, la densidad y tamaño adecuado de las balas de paja y los tipos de acabados superficiales permitidos para los muros construidos con este material.

Este documento pasa por un proceso de revisión cada 3 años y desde 2018 ya cuenta con informaciones mucho más completas para la “construcción de paredes exteriores e interiores, tanto estructurales como no estructurales” (IRC, 2018), incluyendo dibujos y detalles constructivos. En la última revisión, de 2021, además, se ha permitido la construcción de muros estructurales de más de una planta, con la aprobación previa de un correspondiente proyecto de ingeniería.

A nivel europeo, países como Francia, Alemania, Austria, Reino Unido y Suiza han desarrollado directrices técnicas específicas para la construcción con balas de paja. Estos países cuentan con asociaciones y grupos que promueven activamente la construcción con paja y ofrecen guías y recomendaciones técnicas para su uso seguro y adecuado. Además, colaboran estrechamente con las autoridades locales para establecer estándares de construcción y asegurar que estas edificaciones cumplan con las normativas existentes.

La Asociación de Construcción con Fardos de Paja en Alemania, también conocida como *Fachverband Strohballenbau Deutschland* en alemán, ha sido pionera en Europa al establecer una normativa específica para el uso de balas de paja como material de construcción (Nitzkin, 2010). Gracias a la colaboración entre instituciones públicas y privadas, Alemania ha desarrollado una estructura regulatoria ejemplar en este campo.

La Homologación para la Construcción con Balas de Paja, emitida en 2006 por el *Deutsches Institut für Bautechnik* (DIBt), Instituto Alemán de Tecnología de la Construcción, establece criterios técnicos y de seguridad que deben cumplir los sistemas constructivos que emplean balas de paja. Esta aprobación garantiza que dichos sistemas han sido evaluados y cumplen con los estándares requeridos para su uso en edificios en Alemania.

Además, la Directriz De Construcción de Paja (*Strohbaurichtlinie*, en su título original), publicada en 2014 y revisada en 2019, aborda mayoritariamente el uso de las balas de paja como material de aislamiento térmico no estructural, dado que las normas alemanas no permiten el uso de la paja como elemento estructural (Minke, 2006). Esta guía proporciona orientación adicional para asegurar la adecuada aplicación de las balas de paja en proyectos de construcción en el país.

Juntamente con Alemania, Francia ha sido uno de los países líderes en la promoción de la construcción con balas de paja y ha desarrollado normativas y guías técnicas específicas para asegurar la calidad y seguridad de las edificaciones construidas con este material. La Red Francesa de Construcción con Paja (RFCP) fue creada en 2006 con el objetivo de fomentar y desarrollar la validación institucional de este tipo de construcción. Con la publicación del Reglamento Profesional de Construcción de Paja (Reglas CP2012) se inició el proceso de estandarización de la construcción con paja en el país, proporcionando una guía para los fabricantes, un apoyo para los formadores y una garantía para las aseguradoras.

Otros países europeos, como el Reino Unido, Austria y Suiza, también han avanzado en el desarrollo de normativas y regulaciones para garantizar la calidad, eficiencia energética y rendimiento estructural de las construcciones con balas de paja. En general, el panorama en estos países muestra un compromiso significativo con la promoción y regulación de esta práctica constructiva sostenible.

En la actualidad, los países europeos colaboran de manera conjunta a través del programa “Leonardo Da Vinci” de aprendizaje permanente. Su objetivo es desarrollar recomendaciones para las normativas y la formación profesional en el ámbito de la educación en los países miembros. Esta iniciativa busca mejorar la calidad y la eficiencia de la educación, fomentando el intercambio de conocimientos y buenas prácticas entre las naciones europeas participantes.

A diferencia de países como Francia o Alemania, en España, la paja no está incluida como material de construcción en el Código Técnico de la Edificación (CTE). Sin embargo, se permite el uso de materiales y sistemas constructivos innovadores bajo la responsabilidad del proyectista.

Actualmente, la paja no cuenta con una homologación oficial, pero se trabaja en la obtención de la Aprobación Técnica Europea para su uso en construcción (Nitzkin, 2010). Se ha demostrado que es viable obtener el visado para proyectos diseñados con paja, y muchos ya han sido aprobados en varias comunidades autónomas. Para facilitar la obtención de los documentos legales, los técnicos pueden requerir ciertas calidades mínimas del material, especificando las dimensiones de las balas de paja, la densidad mínima, la humedad máxima, entre otros. También la presentación de copias y traducciones de ensayos y normativas de otros países puede agilizar significativamente la tramitación. Sin embargo, para construir con muros de paja portantes, pueden ser necesarios ensayos de resistencia, ya que no está contemplado en el ámbito del CTE.

En España, la Red de Construcción con Paja (RCP), fundada en 2005, es la primera red hispanohablante dedicada a la construcción con paja. Su objetivo principal es divulgar e investigar sobre este material, además de facilitar el contacto entre profesionales y constructores interesados en su uso en la construcción. La asociación ha trabajado en traducir y poner a disposición ensayos y pruebas técnicas en español para respaldar la construcción legal de edificaciones con paja en el país.

La estandarización y homologación de sistemas constructivos con balas de paja son fundamentales para garantizar la calidad de las edificaciones, facilitar la obtención de seguros y préstamos bancarios, que se basan en los requisitos del código técnico. La estandarización también otorgaría credibilidad a estas técnicas constructivas en todos



Figura 3.4 Contraste entre la cantidad de construcciones con balas de paja catalogadas por la Asociación Europea de Construcción con Paja (ESBA) a nivel europeo y en España (ESBA, 2021).

TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN CON BALAS DE PAJA

4

los sectores de la construcción y mejoraría su reputación, reduciendo los argumentos en contra de su práctica.

A pesar de las circunstancias actuales, la construcción con paja está captando creciente atención e interés en España, gracias a sus propiedades sostenibles y la facilidad de obtención del material. Se espera que en un futuro próximo el país cuente también con una normativa específica para la construcción con balas de paja, lo que impulsará aún más las potencialidades de este material y promoverá una manera más sostenible de edificar.

La paja es un material de construcción, no una técnica constructiva. Es un elemento constructivo muy versátil y flexible, lo que permite su utilización de distintas maneras, tanto como elemento portante cuanto como envolvente y aislamiento.

Según Minke (2006), los sistemas constructivos con balas de paja se dividen básicamente en portantes y no portantes. Por otro lado, según MacDonald (2007), éstos se organizan en construcción de muros portantes, no portantes e híbridos. Para el desarrollo de este trabajo, los clasificaremos en sistemas portantes, sistemas mixtos, donde se combina la paja con la madera, siendo en muchos casos esta última la que cumple la función estructural, y técnicas de aislamiento.

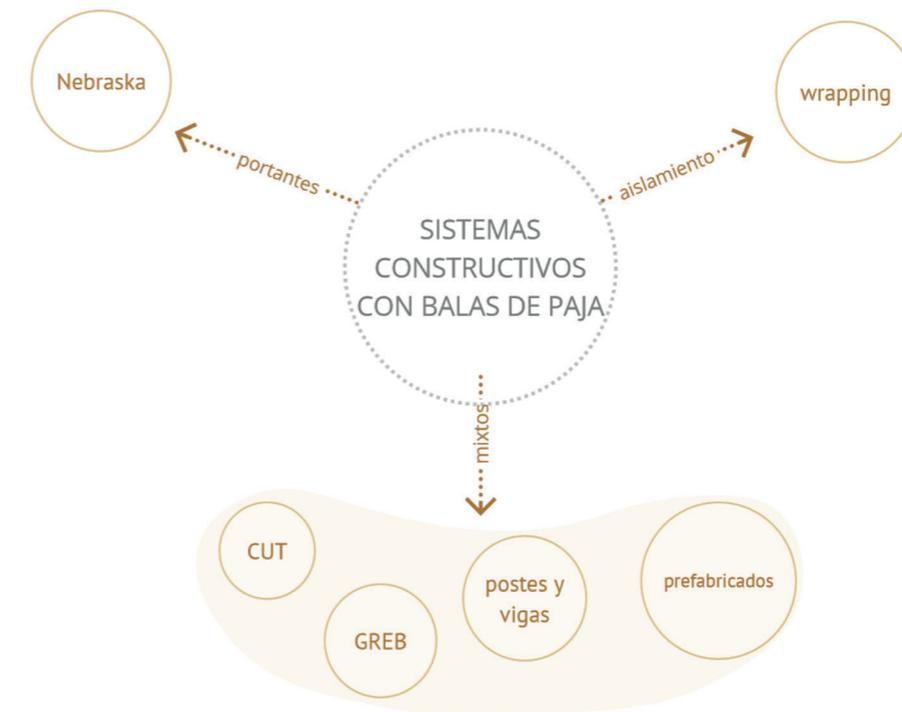
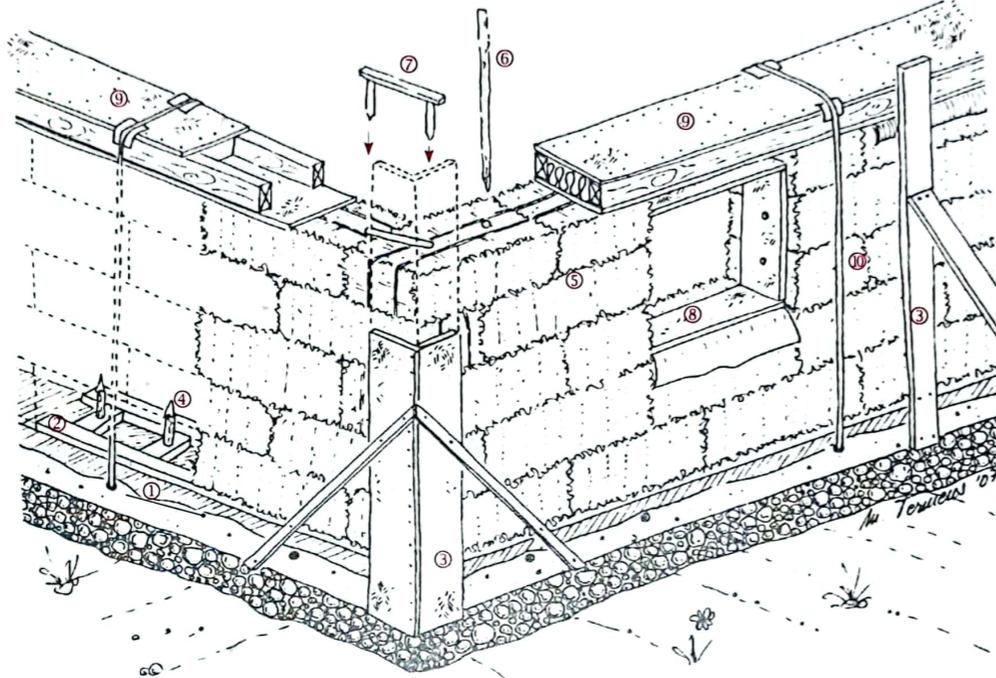


Figura 4.1 Esquema síntesis de las distintas técnicas de construcción con balas de paja (elaboración propia).

4.1 Sistemas portantes

Sistema Nebraska

Figura 4.2 Sistema Nebraska: muro de balas de paja portante (Termens, 2007).



1. lámina impermeable en sobrecimentación
2. marco inferior de madera
3. apuntalamiento y guía para estabilización
4. estacas para fijar bajas de primera hilada
5. balas colocadas a matajuntas
6. estacas en las balas (opcional)
7. grapas en las esquinas
8. marco para ventana
9. zuncho perimetral de madera
10. tensores para comprimir los muros

El estilo Nebraska se destaca como el pionero en la construcción con balas de paja, desarrollado en Estados Unidos a finales del siglo XIX. En este método constructivo, las balas de paja se utilizan como elementos estructurales, lo que permite crear muros portantes con una gran capacidad de carga.

Este sistema de construcción es ampliamente empleado en obras de autoconstrucción debido a su simplicidad y rapidez. Las balas de paja se colocan en hiladas a soga con las juntas verticales contrapeadas, similar a un muro de ladrillos. Además, al requerir menos madera, suele ser una opción más económica.

En España el Código Técnico de la Edificación (CTE) restringe la utilización de la paja como elemento portante, lo que ha limitado su adopción en el país. Sin embargo, se han realizado numerosas construcciones legales empleando esta técnica, incluso de dos plantas (Nitzkin, 2010).

El proceso constructivo del estilo Nebraska consiste en proteger la sobrecimentación de la humedad; disponer el marco inferior de madera, con dos estacas por bala para fijar la primera hilada; colocar y apuntalar los marcos de las puertas y, en su momento, lo de las ventanas; disponer las balas a matajuntas, grapando las esquinas en cada hilada; colocar el zuncho perimetral superior, que garantiza un reparto uniforme de las cargas de la cubierta sobre las paredes y aporta estabilidad frente a las fuerzas de vientos y sismos; y, finalmente, los tensores/amarres para comprimir los muros.

La precompresión de los muros de paja mediante este proceso es esencial, ya que, al ser un material blando, un muro no precomprimido deberá pasar por un período de 3 a 10 semanas de compresión natural por las cargas de la cubierta hasta estabilizarse (MacDonald, 2007). La compresión media a la que se someten las balas de paja tras la ejecución de la cubierta es de aproximadamente el 6% de su altura (Nitzkin, 2010). Una vez revocado por ambas caras, el muro y el revestimiento trabajan en conjunto, proporcionando mayor resistencia y rigidez a la estructura.

Ventajas del sistema:

- Sencillez y rapidez de ejecución, lo que lo hace ideal para la autoconstrucción.
- No requiere conocimientos profundos sobre construcción, lo que facilita su uso por parte de personas sin experiencia en el campo.
- Permite la creación de formas curvas con facilidad, ofreciendo flexibilidad en el diseño arquitectónico.
- Alta flexibilidad y capacidad de absorber el movimiento sísmico, lo que lo convierte en una opción segura para zonas con actividad sísmica. La deformación de las balas de paja es de tipo elástico, lo que les permite volver a su estado original después de cesadas las cargas (Minke, 2006).
- Utiliza principalmente paja como material de construcción, lo que reduce costos y aprovecha todas las cualidades de este material, funcionando como estructura y envolvente.

Desventajas del sistema:

- Al colocar las balas de paja de manera plana, el espesor total de la pared puede rondar los 50 cm (45-47 cm del fardo, más 1,5-2,5 cm de revestimiento en cada cara), lo que aumenta la superficie construida en relación a la útil.
- Dificultad para encontrar empresas constructoras especializadas en este método de construcción.
- Limitaciones para crear espacios interiores diáfanos en muros de más de 5 metros debido a la necesidad de arriostamiento por muros perpendiculares.
- Las aberturas en el muro no deben superar el 50% de su superficie total.
- Solo es adecuado para construcciones de hasta 2 plantas.

4.2 Sistemas mixtos

Sistema CUT (Cells Under Tension)⁸

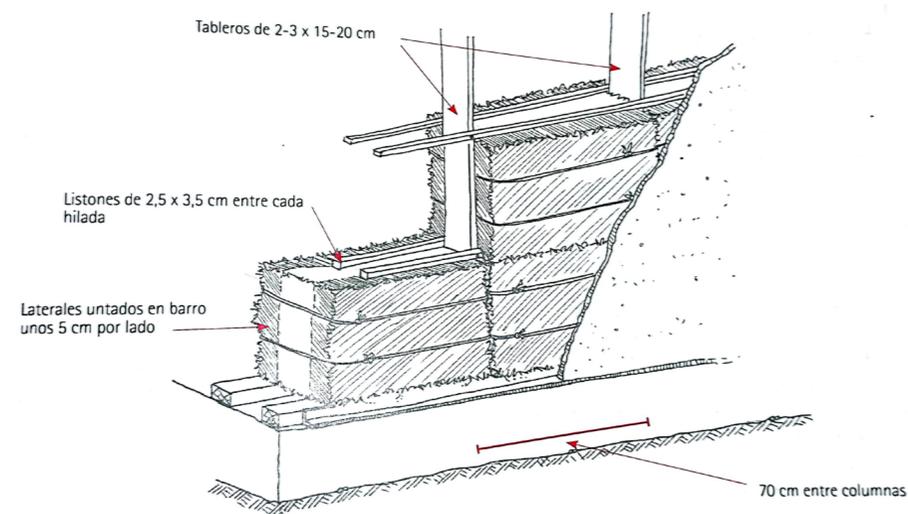


Figura 4.3 Sistema CUT (Termens, 2010).

Este es un sistema innovador creado por el holandés Tom Rijven, que combina la utilización de madera y balas de pajas. En este método, las balas de paja quedan comprimidas por los listones horizontales de madera que forman el entramado.

La característica principal del sistema de Rjiven es su enfoque en facilitar la adhesión de las capas de revoco en las bajas de paja. Para lograr esto, se utiliza un prerrevoco que consiste en aplicar una imprimación de tierra arcillosa sobre las balas de paja antes de su instalación en los marcos de madera. Esta técnica mejora la adhesión, pero presenta la limitación de requerir el uso de fardos más pequeños de 70 cm, ya que se dificulta el trabajo con fardos más grandes debido al peso añadido por la barbotina.

Una de las principales ventajas del sistema CUT es su naturaleza mixta, ya que en realidad son las balas de paja las encargadas de soportar la mayor parte de las cargas, pero tanto los fardos de paja como los montantes de madera contribuyen a la estabilidad general del sistema. Esto permite utilizar montantes de madera de secciones más pequeñas, lo cual abarata y facilita el proceso de construcción, ya que la función estructural recae principalmente en las balas de paja.

Por esa razón, se trata de un sistema más fácil de justificar de cara a las exigencias técnicas del CTE, dado que lleva incorporada una estructura de madera y la paja no se emplea como único elemento estructural.

A diferencia del estilo Nebraska, en el sistema CUT las balas de paja se colocan de canto, es decir, con una de las caras en la que se encuentran los cordeles hacia el exterior. Estas balas deben tener un tamaño mayor que la distancia entre los montantes, generalmente unos 5 cm adicionales (Nitzkin, 2010). Al introducir las balas, se comprimen aún más, aumentando su capacidad de carga. Esta compresión se logra al tensar las balas de paja entre listones horizontales y marcos verticales. Una vez posicionadas, las cuerdas se cortan para permitir que la paja se expanda y se asiente, cubriendo el espacio entre los montantes sin necesidad de agregar relleno adicional de barro o paja. Además, se aprovecha el espacio generado entre las juntas para el paso de instalaciones.

⁸ En castellano, Cédulas Bajo Tensión.

Otra importante diferencia respecto al estilo Nebraska es que con el sistema CUT no es necesario realizar la precompresión de la pared después de ejecutada. La estructura de madera rellena de paja resulta en un conjunto sólido y compacto en el cual cada célula de bala de paja está a presión tanto axial, como lateralmente.

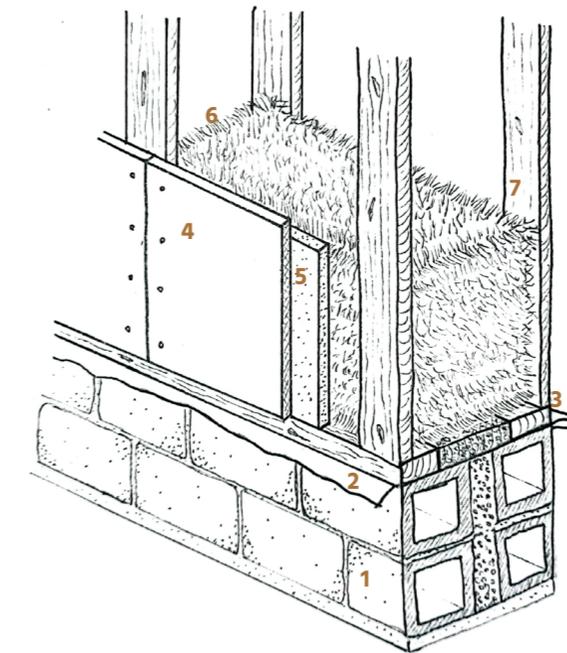
Ventajas del sistema:

- Al estar las balas de paja dispuestas de canto (su lado más corto), se logra reducir ligeramente el espesor total del muro.
- El mantenimiento o reparación puntual del muro es más sencillo debido a que las balas de paja se apilan una sobre otra y están separadas por el entablillado de madera, de manera independiente.
- Requiere menos madera en comparación con otros sistemas mixtos.
- Las balas de paja colaboran estructuralmente con el arriostamiento del entramado de madera, aprovechando así las cualidades resistentes del fardo como elemento constructivo.
- La colocación de las balas de paja es más fácil y precisa, ya que los montantes de madera previamente nivelados sirven de guía para su disposición.

Desventajas del sistema:

- Al incorporar otro material al muro de balas de paja, es necesario prestar especial atención a los puntos de unión entre la madera y la paja para evitar fisuras en el revoco.
- La ejecución de formas curvas se dificulta debido a que la paja va contenida dentro de marcos rectangulares de madera.
- Se requiere especial cuidado en las esquinas, ya que la bala de paja no expande lo suficiente como para rellenar completamente el espacio entre montantes y se hace necesario incorporar un relleno adicional para evitar puentes térmicos.

Sistema GREB



1. sobrecimentación con aislamiento entre bloques
2. lámina impermeable
3. marco inferior de madera (durmiente)
4. encofrado (tablero OSB)
5. mortero GREB
6. bala de paja
7. montantes verticales

Figura 4.4 Sistema GREB (elaboración propia, 2023).

La técnica GREB fue desarrollada en Quebec, Canadá, a principios de los años 1990 por el Grupo de Investigación en Ecología de la Bahía (de ahí su nombre: *Groupe de Recherche Écologique de la Baie* – GREB, en francés).

Este método constructivo combina las balas de paja con una estructura ligera de madera compuesta de doble montantes de 10 x 4 cm, entre los cuales se colocan las balas de paja. Después de colocar los fardos, se atornillan los encofrados en los montantes de madera y se reviste con una capa de entre 4 y 6 cm del mortero GREB, elaborado con 4 partes de serrín, 3 de arena, 1 de cal y 1 de cemento.

Se recomienda la cal hidráulica, que destaca por su elevada resistencia a la compresión (aproximadamente 5 MPa). Además, ofrece beneficios como excelente aislante acústico y una característica fundamental para el mortero GREB: permeabilidad al vapor de agua. El cemento se incorpora debido a su alta resistencia a la compresión y su capacidad para acelerar el proceso de construcción, permitiendo el desencofrado de las estructuras a las 24 horas. El serrín es un componente que aligera el mortero y juega un papel importante en la regulación de la humedad en las estructuras, compensando la transpirabilidad

restada por el cemento. Por último, la arena, que puede tener diversas procedencias y tipos, cumple la función de agregar dureza y volumen al mortero. Además, garantiza una superficie lo suficientemente rugosa para facilitar la adherencia del recubrimiento (López, 2010).

Una vez que las paredes están revocadas y recubiertas con la ayuda de encofrados sujetos a los montantes de madera, el mortero arriestra el entramado de madera, y ambos elementos colaboran estructuralmente para cumplir la función portante. En esta técnica, la paja contribuye únicamente como cerramiento y aislamiento. Esta es la gran innovación del sistema: la unión total de la paja, mortero y clavos de los montantes, proporciona gran estabilidad y rigidez al conjunto.

A diferencia del sistema CUT, en el método GREB, los montantes de madera tienen secciones ligeramente más grandes y el elemento que colabora estructuralmente no es la paja, sino el mortero.

Ventajas del sistema:

- Permite la construcción de varias alturas, brindando flexibilidad al proyecto arquitectónico.
- Facilidad y rapidez de construcción al utilizar una única sección de listones y un solo tipo de tornillo, optimizando el rendimiento y aprovechamiento.
- No es necesario realizar la precompresión mecánica de las balas de paja al finalizar la ejecución del muro
- Permite el taladro y atornillado a la pared en cualquier punto del muro debido a la gran resistencia del mortero, lo que facilita la fijación de muebles u objetos en los muros de la casa.
- La capa exterior de mortero tiene entre 4 a 6 cm, proporcionando una excelente protección a las balas de paja.

- Las balas de paja no necesitan estar tan comprimidas dentro de los montantes, ya que la combinación con la madera y el mortero proporciona solidez al muro.

Desventajas del sistema:

- Requiere más madera que el sistema CUT, lo que puede incrementar los costes de la construcción.
- Incorpora cemento, lo que aumenta la huella ecológica de la construcción al generar emisiones de CO2 durante la producción de este material. Aunque se puede prescindir de ello y sustituirlo por cal.

Sistema porticado

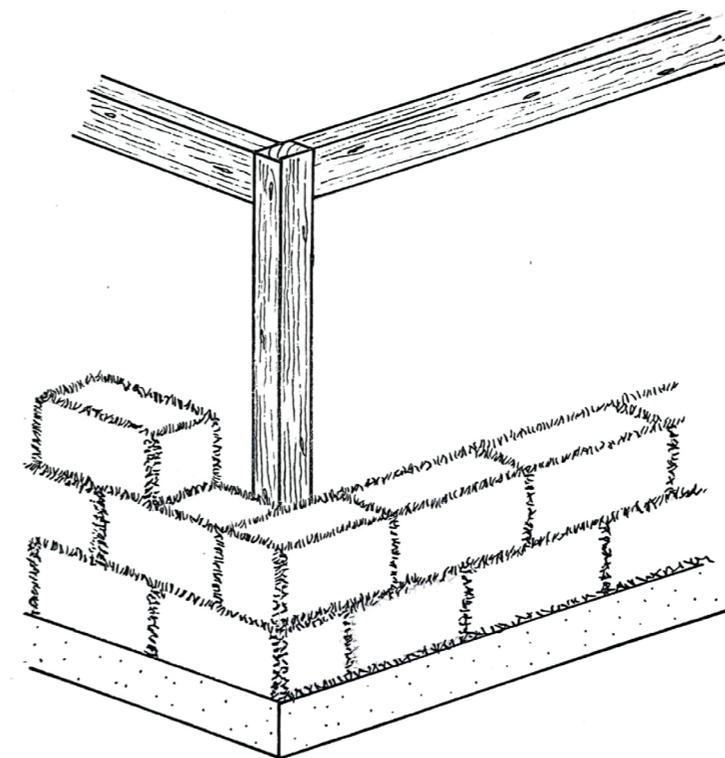


Figura 4.5 Sistema de postes y vigas (elaboración propia, 2023).

Consiste en el empleo de pilares y vigas para sostener el peso de los forjados y la cubierta, utilizando la paja únicamente como cerramiento y aislamiento térmico. Las balas de paja son dispuestas a rompejuntas, similar a un muro de ladrillos. La estructura porticada suele ser de madera, por su excelente combinación con las balas de paja. Sin embargo, también es posible utilizar estructuras de hormigón armado, acero o ladrillo, aunque se prefiere aquella que provenga de materiales locales y que tenga un bajo impacto ambiental.

En este método, los muros pueden ocultar los pilares o ser exentos a ellos. En el segundo caso, es necesario estabilizar el muro mediante un elemento de arriostamiento, como el zuncho superior perimetral, particiones interiores o incluso el propio revoco, por medio de la colocación de clavos que sobresalen en los pilares de madera el revoco permite asegurar la unión paja-madera.

En caso de estar el pilar enrasado a la pared, para revocar sobre él se utiliza una tela de yute o cañizo, debidamente solapada por encima del fardo y el pilar, lo que permite una adecuada adherencia del revoco, actuando también como una fijación del muro a la estructura.

Ventajas del sistema:

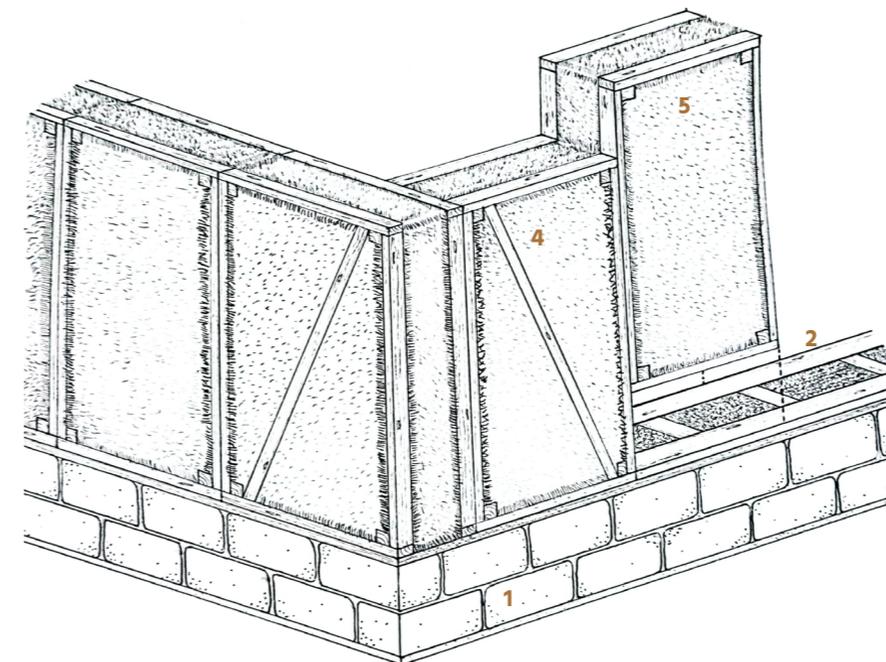
- Permite la construcción de edificios de mayor altura, sin limitaciones.
- Se asemeja más a los métodos de construcción convencionales, lo que disipa la creencia de que las balas de paja no son resistentes.
- Al dar continuidad al aislamiento, se evitan puentes térmicos.
- La estructura puede ser utilizada para soportar elementos pesados y servir como guía para la construcción de los muros, facilitando el trabajo a plomo.

Desventajas del sistema:

- Es necesario estabilizar el muro en caso de que no esté en contacto directo con la estructura.

- Requiere especial atención para resolver los encuentros entre el muro y la estructura, con el fin de evitar la aparición de fisuras en el revoco y la formación de puentes térmicos.
- En caso de empotrar o enrasar el pilar al muro, es necesario cortar las balas de paja para encajarlas con precisión, lo que puede ralentizar el proceso constructivo.

Módulos prefabricados



1. sobrecimentación e impermeabilización
2. zuncho inferior de madera tipo escalera
3. aislamiento térmico
4. módulo de esquina
5. módulo prefabricado

Figura 4.6 Módulos prefabricados. Dibujo elaborado a partir de ilustración de Brandon Meléndez (elaboración propia, 2023).

Los sistemas prefabricados representan una técnica novedosa en el campo de la construcción con paja. Al tratarse de un método industrializado, los módulos llegan a la obra listos para ser ensamblados lo que garantiza un mayor control sobre la fabricación y calidad de la ejecución, a la vez que reduce significativamente el tiempo de construcción de la envolvente y optimiza la ejecución y organización de la obra.

La estandarización e industrialización de este sistema constructivo facilita la integración de la paja, un material proveniente del campo, a los entornos urbanos y en edificios de mayor envergadura. Su semejanza con materiales convencionales, como otros tipos de paneles prefabricados ampliamente utilizados, expande sus posibilidades de aplicación, manteniendo los beneficios térmicos, higrotérmicos y medioambientales que ofrece la paja. Además, al haber sido sometidos a ensayos normalizados y estandarizados, los paneles inspiran mayor confianza en su utilización.

En el mercado ya existen diversas empresas fabricantes de paneles con especificaciones propias y productos ensayados. Es posible encontrar paneles con resistencia al fuego de REI120 (EcoCocon) e incluso R150 (Ecopaja); además, con capacidad de aislamiento acústico de 49 dB (Alfawall y Ecopaja), e incluso hasta 54 dB (EcoCocon).

En general, estos paneles constan de marcos de madera formados por listones verticales dispuestos paralelamente, conectados entre sí por travesaños horizontales y por un diafragma de compresión intermedio. El relleno de paja se realiza a una compresión mínima de 110 kg/m³ (EcoCocon), e incluso puede alcanzar una densidad de 120 kg/m³ (AlfaWALL) o de 135 a 185 kg/m³ (Ecopaja). La fibra vegetal comprimida, en colaboración con la madera, asegura la estabilidad, solidez y resistencia estructural de los muros portantes.

Ventajas del sistema

- Montaje fácil, rápido y preciso.
- Es un sistema portante, lo que permite prescindir de una estructura adicional o combinarlo con otra estructura, utilizándolo únicamente como cerramiento y aislamiento.
- Los paneles pueden ser producidos tanto por empresas especializadas como en talleres, siempre y cuando se garantice la seguridad estructural de la madera.
- La producción de los paneles en taller no se ve afectada por las condiciones climáticas, lo que asegura un proceso más controlado.

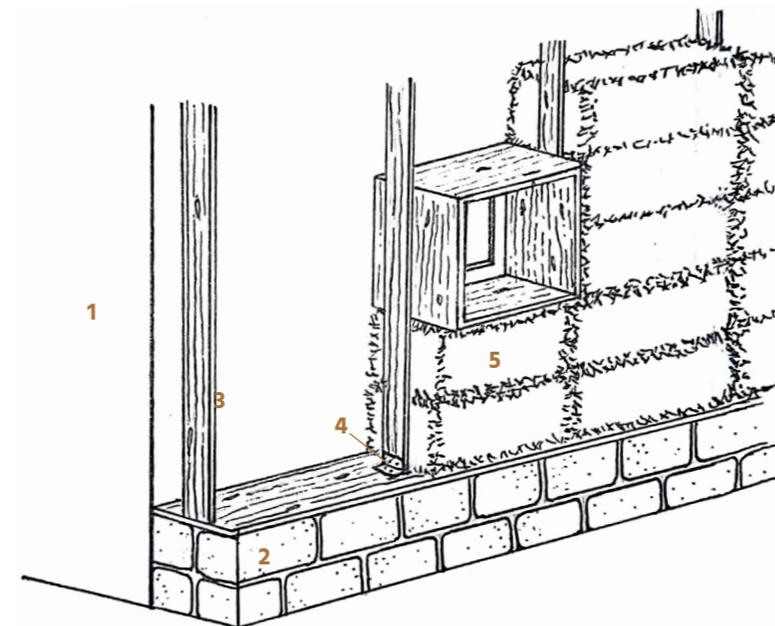
- Permite la construcción de edificios de hasta 4 a 6 plantas.

Desventajas del sistema:

- Requiere una mayor cantidad de madera en comparación con otros sistemas mixtos previamente mencionados.
- El coste de la obra realizada con este sistema puede ser más elevado
- Se necesita mano de obra especializada para el montaje, lo que imposibilita su aplicación en autoconstrucción.

4.1 Técnicas de aislamiento y revestimiento

Wrapping o SATE de paja



1. muro existente
2. sobrecimentación e impermeabilización
3. estructura auxiliar
4. fijación de los montantes
5. balas de paja

Figura 4.7 Sistema de aislamiento térmico por el exterior de paja (elaboración propia, 2023).

La técnica del “wrapping” o “SATE de paja” se basa en utilizar la paja como material aislante en el sistema SATE (Sistema de Aislamiento Térmico por el Exterior). El objetivo principal es mejorar la envolvente térmica del edificio, reduciendo las pérdidas de calor en invierno y el sobrecalentamiento en verano, lo que contribuye a reducir el impacto ambiental generado por el consumo energético de calefacción y refrigeración.

En el SATE de paja, se emplean balas de paja comprimida como material aislante. Éstas se sujetan mediante una subestructura de madera anclada mecánicamente a la cara exterior de los muros. Esta subestructura puede estar formada por bastidores o listones de madera con diferentes dimensiones, según el relleno de paja deseado, generalmente entre 15 y 35 cm. Además, se utilizan tableros de fibra de madera alrededor de puertas y ventanas para mejorar el soporte mecánico, aislar los marcos originales y facilitar la aplicación directa del revoco.

Una vez fijada la paja a la pared, se aplica un mortero de cal como revestimiento exterior, manteniendo las características ecológicas y transpirables del sistema constructivo con paja. Este mortero de cal protege y sella la paja, proporcionando un acabado estético y funcional a la construcción.

Ventajas del sistema:

- Permite la rehabilitación energética de edificaciones ya existentes.
- Mejora significativamente el aislamiento térmico y acústico del edificio, reduciendo las pérdidas de calor y proporcionando un mayor confort interior.
- Elimina los puentes térmicos, evitando las zonas donde se generan mayores pérdidas de calor y mejorando la eficiencia energética.

Desventajas del sistema:

- Al aumentar el espesor del muro con el aislamiento exterior, puede reducir la dimensión de los aleros, lo que exige una ejecución meticulosa del revestimiento para asegurar la protección adecuada de la paja.

- La obra se realiza a la intemperie, lo que requiere una protección adecuada de la paja durante toda la duración de los trabajos para evitar daños ocasionados por las condiciones climáticas.

4.2 Estudio de casos

Centro de día para personas dependientes

Ubicación: Meliana, Valencia

Año: 2022

Arquitecto/a: Virai Arquitectos y PSP Estudi

Uso: Equipamiento público

Superficie: 2.179 m²

Sistema utilizado: módulos prefabricados de madera y paja

Este proyecto surge como resultado de un concurso de arquitectura destinado a la creación de un Centro de Día dedicado a personas mayores. El edificio se caracteriza por su innovador enfoque en la bioconstrucción, siendo construido con una combinación de pilares y vigas de madera laminada, forjados de paneles de madera contralaminada (CLT) y módulos prefabricados de madera y paja. Este centro, el edificio más grande construido con bioconstrucción en España hasta la fecha, tiene como objetivo atender a 80 personas mayores y acoger a 30 trabajadores.

La premisa fundamental de este proyecto es replantear la relación entre un edificio y sus usuarios, en este caso, personas en situación de vulnerabilidad. Para ello, el diseño se articula en torno a un patio central que no solo fomenta la conexión con el entorno exterior, sino que también facilita la movilidad y el recorrido circular de las personas con demencia.

Un elemento clave en la construcción es la utilización de paja, principalmente procedente de los cultivos de arroz en L'Albufera de Valencia. Esta elección de materiales naturales contribuye a la creación de un espacio interior saludable, exento de sustancias tóxicas y con un impacto ambiental notablemente reducido.

El logro más significativo de este proyecto radica en la incorporación exitosa de la paja como material constructivo en una obra pública, sometida a los procedimientos de licitación y restricciones presupuestarias inherentes a tales proyectos. Esto sentó un precedente importante al fomentar la adopción de métodos constructivos alternativos en obras similares, tanto en la Comunidad Valenciana como en todo el país.



Figura 4.8 Fachada principal (HNA, 2023)

Figura 4.9 Axonometría del programa (HNA, 2023)

Figura 4.10 Módulos prefabricados en taller, aún sin el relleno de paja (CTAV, 2021).

Figura 4.11 Interior del edificio en fase de construcción (CTAV, 2021).

Figura 4.12 Patio interior (Ayuntamiento de Meliana, 2023).



Centro recreativo Jacques Chirac

Ubicación: Rosny-sous-Bois, Francia

Año: 2020

Arquitecto/a: Oficina Técnica del Ayuntamiento de Rosny-sous-Bois

Uso: Equipamiento educacional público

Superficie: 1.126 m²

Sistema utilizado: Nebraska (muros de paja estructurales)

Este proyecto corresponde a un centro de ocio situado en el complejo escolar de Bois-Perrier, en la región de Ile-de-France, con la capacidad para acoger 180 niños después de la escuela o durante las vacaciones escolares.

El departamento de gestión de proyectos de la ciudad de Rosny-sous-Bois tiene una clara visión de mantener y mejorar el patrimonio público, teniendo en cuenta el contexto climático actual. Su objetivo es minimizar el impacto de los nuevos edificios escolares municipales, optando por técnicas constructivas y materiales de bajo impacto ambiental, como la paja y la madera, descartando materiales o técnicas dañinas para el medio ambiente.

En todas las fachadas, excepto en la sur, donde se ha utilizado un gran paño acristalado protegido por parasoles horizontales (fig. 4.13), se ha elegido la paja estructural como una forma de limitar el uso de la madera y fortalecer el ecosistema local. Además de paja, en la construcción también se han empleado madera, aislamiento de algodón reciclado y pinturas de aceite de colza orgánicas.

Los elementos contruidos en madera incluyen los pilares, vigas de forjado, celosías de la cubierta, carpintería y diversos revestimientos exteriores. La madera proviene de varias especies de árboles de los bosques de la región, siendo una de ellas el castaño de Ile-de-France, que puede ser usado tanto en interiores como en exteriores sin tratamiento. La paja utilizada es de origen ecológico, proveniente en parte de una granja agroforestal en Eure-et-Loir (a 125 km de distancia) y el resto de Yvelines (a 67 km de distancia).

El proyecto también incorpora otras estrategias sostenibles, como la instalación de colectores solares para calentar agua y proporcionar parte de la calefacción; una estufa de mampostería (conocida como estufa de acumulación) que, gracias a sus gruesos muros, difunde el calor gradualmente en el ambiente durante varias horas, reduciendo así el consumo energético asociado con la calefacción; la implementación de un sistema de ventilación natural para la renovación de aire, donde el aire fresco entra a través de aberturas ubicadas sobre las ventanas y se extrae mediante torres de viento en el techo, creando un efecto de “corriente térmica” (fig. 4.16); la introducción de baños secos tanto para adultos como para niños, como medida de ahorro de agua potable; la incorporación de tanques subterráneos para el almacenamiento de agua de lluvia, que, después de potabilizada, se utiliza en los juegos acuáticos de verano; y, finalmente, la creación de huertos en la azotea para fomentar la biodiversidad y acercar a los niños al cuidado de la naturaleza.

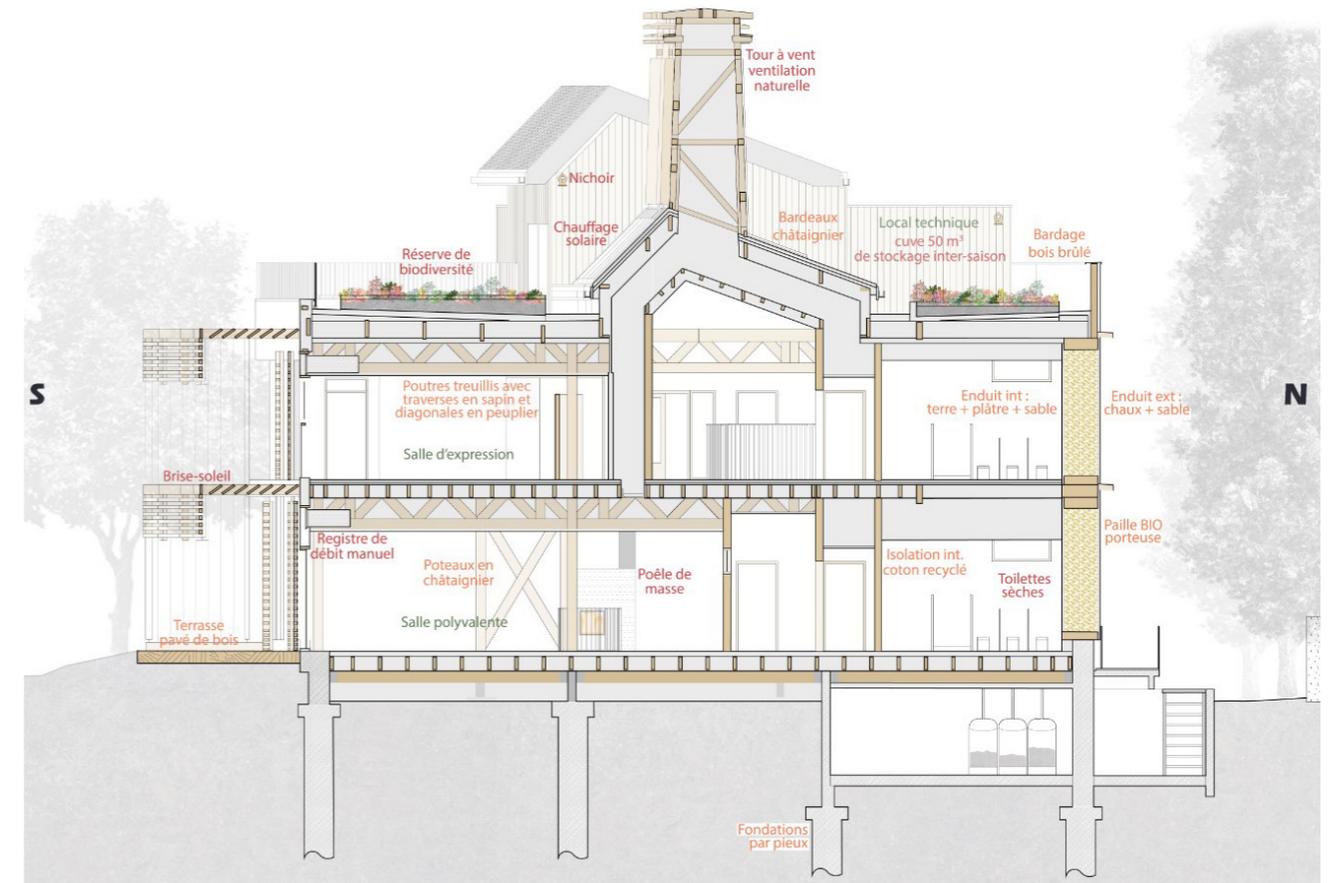
Figura 4.13 Fachada sur: paño acristalado con protección solar (Construction 21 France, 2021).



Figura 4.14 Muros de carga de paja en ejecución (Construction 21 France, 2021).

Figura 4.15 Interior del edificio (Construction 21 France, 2021).

Figura 4.16 Sección transversal (Construction 21 France, 2021).



Edificio Jules Ferry

Ubicación: Saint-Dié-del-Vosges, Francia

Año: 2013

Arquitecto/a: ASP Architecture

Uso: Residencial plurifamiliar (vivienda protegida)

Superficie: 1.350 m²

Sistema utilizado: SATE de paja

El edificio se encuentra en las proximidades del centro de la ciudad de Saint-Dié-des-Vosges, en una parcela de aproximadamente 2500 m² que incluye parte del patio de una antigua escuela. Este proyecto consta de dos bloques dispuestos paralelamente, uno de 3 plantas y otro de 7 plantas, diseñados para aprovechar al máximo la exposición solar en ambos volúmenes. El bloque de 3 plantas alberga 7 viviendas, mientras que el bloque de 7 plantas contiene 19 viviendas, lo que suma un total de 26 viviendas de carácter social. En su momento, el bloque de 7 plantas fue considerado como la construcción más alta de Europa realizada con madera maciza.

El promotor de este proyecto es una empresa especializada en la construcción y alquiler de viviendas sociales, con un enfoque en el uso de materiales de origen biológico y alto rendimiento energético en este tipo de viviendas.

Los edificios están compuestos por paneles estructurales de madera contralaminada (CLT) y están aislados externamente mediante cajas prefabricadas de madera rellenas de paja con un espesor de 40 cm, superando significativamente los requisitos de transmitancia térmica establecidos por la normativa francesa. Dado que la madera y la paja consisten completamente en fibras vegetales, las paredes exteriores permiten una difusión libre del vapor de agua y favorecen la regulación natural de la humedad en el edificio.

Las cajas aislantes prefabricadas de paja se fijan directamente sobre la estructura de madera maciza, utilizando como soporte el listón del revestimiento de alerce y terracota (fig 4.19).

En términos de huella de carbono, este proyecto ha logrado un saldo positivo de 1100 toneladas de CO₂, con 1000 toneladas almacenadas en los 1000 m³ de madera utilizados,

200 toneladas almacenadas en los 600 m³ de paja empleados y 100 toneladas consumidas durante la construcción, principalmente en forma de hormigón y acero. En comparación, el estudio de arquitectura a cargo del proyecto señala que la construcción del mismo edificio utilizando métodos convencionales, como hormigón, poliestireno o PVC, generaría un saldo negativo de 600 toneladas de CO₂ en la atmósfera. Esto equivaldría al consumo de calefacción y agua caliente para el edificio durante 50 años si se utilizara gas, o al recorrido de 6 millones de kilómetros en un automóvil (equivalente a dar 150 vueltas alrededor de la Tierra).

Gracias a las estrategias implementadas, el edificio resultante tiene unas necesidades energéticas significativamente más bajas, con un 50% menos de consumo energético. Se ha prescindido de los sistemas de calefacción convencionales, como radiadores o suelo radiante, en favor de una unidad colectiva de doble flujo de alta eficiencia energética, que proporciona el 80% del consumo. Además, en cada vivienda se ha instalado una batería de calefacción de un solo terminal para cubrir el 20% restante. Esta batería se alimenta de una bomba de calor geotérmica y de la energía residual del aire extraído del sistema de doble flujo. El agua caliente sanitaria se produce utilizando exclusivamente fuentes de energía renovable. Como resultado, el gasto energético anual para los inquilinos se sitúa en alrededor de 132 euros.

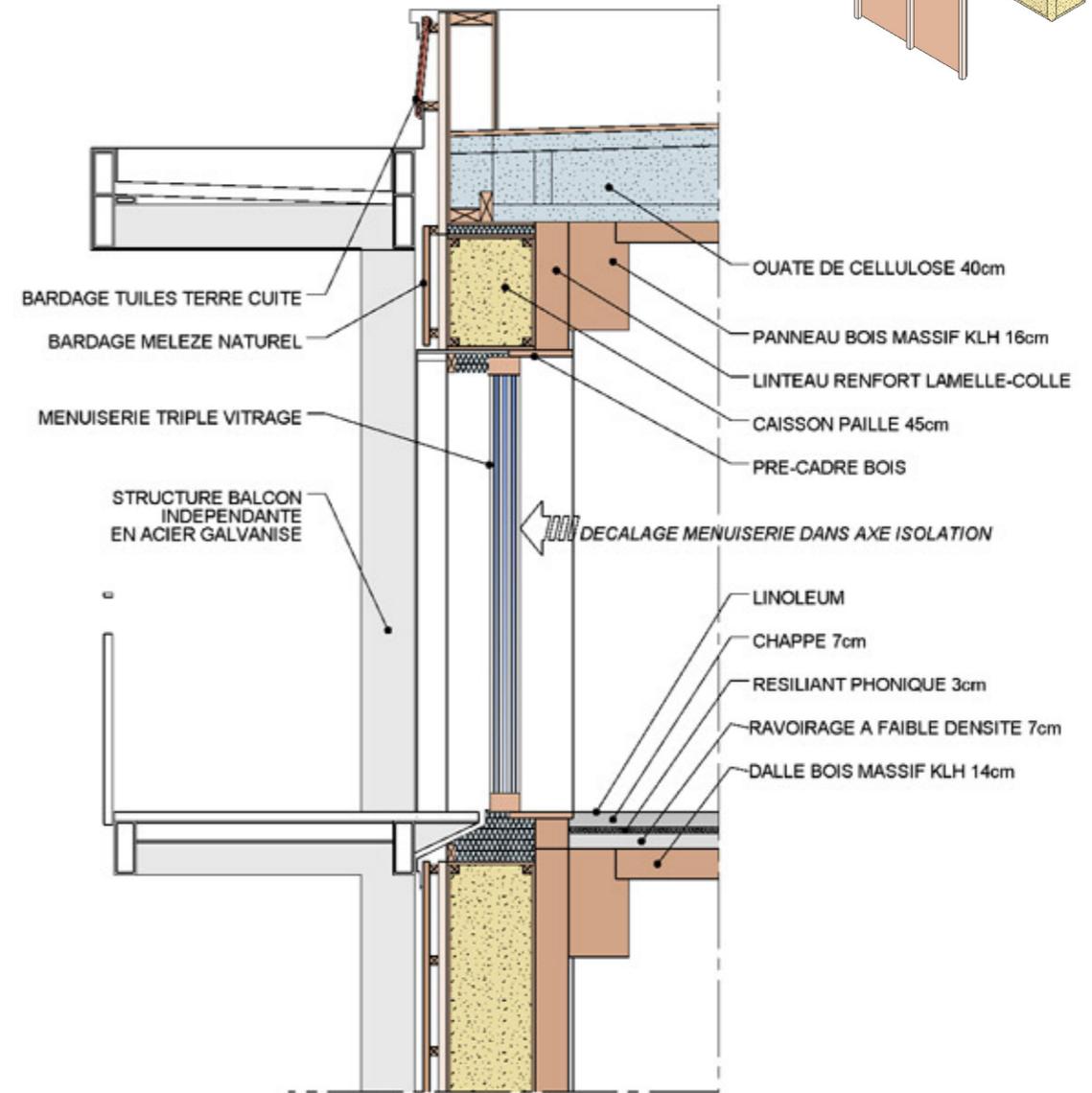
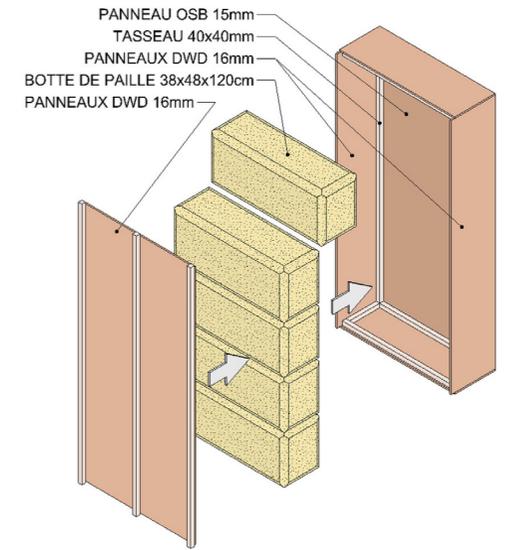


Figura 4.17 Bloque de 7 plantas, fachada sur (ASP Architecture, 2019).



Figura 4.18 Interior de una de las viviendas (ASP Architecture, 2019).
Figura 4.19 Esquema de la fijación de las cajas de aislamiento y del revestimiento exterior (ASP Architecture, 2019).

Figura 4.20 Esquema de la caja prefabricada rellena con paja (ASP Architecture, 2019).
Figura 4.21 Detalle constructivo dintel/balcón última planta (ASP Architecture, 2019).



5.1 Resumen y comparación de los sistemas constructivos abordados

Cada sistema constructivo presenta características propias, así como ventajas y desventajas inherentes. A continuación, se presenta un breve resumen de los dos grupos de técnicas constructivas abordados.

El método constructivo en que se utiliza la bala de paja con función portante es de ejecución bastante rápida debido a su sencillez constructiva, que puede prescindir de mano de obra especializada, y al rendimiento de las balas de paja por metro cuadrado. Dado que no requiere una estructura adicional y exige una cantidad de madera bastante inferior si comparado a otros sistemas, puede ser un método más económico debido al ahorro que esto significa. No obstante, se limita considerablemente la altura de la edificación y se presenta el desafío de garantizar una adecuada compresión y sellado de las balas de paja para evitar asentamientos y filtraciones de aire.

A pesar de ser un método ampliamente ensayado y comprobado, el uso de las balas de paja con función estructural sigue encontrando impedimentos legales y normativos en algunos países, como Alemania y España. En cambio, en Estados Unidos, Francia, Inglaterra, Holanda, Dinamarca, Austria y Suiza las construcciones con balas de paja portantes son permitidas y cuentan con respaldo legal (Minke, 2006).

Por otro lado, los sistemas constructivos mixtos, en los cuales la paja es combinada con la madera, siendo ésta la que cumple mayoritariamente la función estructural, el coste de ejecución aumenta considerablemente dependiendo de la técnica empleada debido a la necesidad de mano de obra especializada, de equipos específicos y de más material. En contrapartida, la limitación de altura deja de ser un impedimento y la incorporación de la industrialización en los métodos constructivos más recientes acelera aún más el proceso de construcción, aumentando la uniformidad y calidad de la edificación. Aún así, es necesario prestar especial atención al sellado de las juntas para evitar las infiltraciones de aire y el contacto de la paja con el agua.

En el ámbito normativo, los sistemas constructivos de balas de paja combinadas con madera encuentran menos dificultades de obtener licencia y menos perjuicios en

general, puesto que no se confía la integridad estructural solamente a la bala de paja.

En resumen, no es posible afirmar que una técnica es mejor que la otra. La elección del sistema de construcción con balas de paja dependerá de diversos factores, como el presupuesto, la disponibilidad de materiales, la experiencia del constructor, la ilusión del promotor de participar activamente en la construcción, la ubicación de la obra (ya que obras en entornos urbanos consolidados dificultan el acopio de las balas de paja y casi demandan un sistema más industrializado), entre otros. Cada uno tiene sus propias consideraciones específicas que deben ser tenidas en cuenta durante la planificación y la ejecución. En última instancia, todos estos sistemas son significativamente más sostenibles y eficientes energéticamente en comparación con las técnicas constructivas convencionales de hormigón y ladrillo, siempre que se diseñen y ejecuten de manera adecuada.

5.2 Evaluación de la sostenibilidad y eficiencia energética

Estimar la sostenibilidad y la eficiencia energética de las construcciones con balas de paja es esencial para comprender su impacto ambiental y su capacidad para satisfacer las demandas actuales de construcción.

El indicador crucial en esta estimación es el Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés), también conocido como huella de carbono. El GWP mide la capacidad de un determinado gas para retener calor en la atmósfera en comparación con la misma cantidad de dióxido de carbono (CO₂). Un mayor valor de GWP indica un mayor impacto en el calentamiento global. En resumen, el GWP evalúa cómo un gas puede contribuir al efecto invernadero y, por lo tanto, al cambio climático.

Los materiales orgánicos, como la paja, presentan tasas negativas de GWP (fig. 5.1), lo que implica que durante su producción absorben más gases de efecto invernadero de los que emiten. Esto significa que contribuyen a reducir la cantidad total de gases relacionados con el calentamiento global en lugar de aumentarla. En consecuencia, generan un impacto positivo en la mitigación del cambio climático. Un estudio sobre el ciclo de vida de las balas de paja, reveló una reducción anual de 1230 kgCO₂ equivalente

en comparación con una casa de madera aislada convencional. (Alcorn y Donn, 2010, citado en Hu, 2023).

Por otra parte, cada metro cúbico de hormigón que se sustituye por paja, se logra una disminución de 800 kg en las emisiones de CO₂, según datos de la Red de Construcción con Paja de España. Además, al llegar al final de su vida útil, la paja puede reintegrarse al medio ambiente de manera completamente limpia, sin requerir tratamientos adicionales.

Respecto a la eficiencia energética y el confort térmico, se ha probado que la temperatura interna de una casa de paja se mantiene constante y dentro de un rango de confort. Un estudio realizado en Reino Unido ha monitoreado una casa de paja durante 6 años, de 2015 a 2020, analizando separadamente las temporadas de calefacción y refrigeración. Marincioni y Bradshaw (2023) constataron que la temperatura media del periodo de frío (octubre a marzo) fue de 19,3 °C, y la temperatura media del período estival fue de 22,3 °C, llegando a un máximo de 29,2 °C durante una ola de calor en 2018, cuando los sensores exteriores marcaban 35,7 °C, y sin la utilización de refrigeración activa en el edificio. De esta manera se constata la considerable reducción de la utilización de sistemas activos de refrigeración y calefacción debido al excepcional aislamiento térmico que proporcionan las balas de paja.

Por lo tanto, la paja como material de construcción se muestra como una solución prometedora, ya que ofrece altos niveles de aislamiento asociados con un bajo impacto ambiental, contribuyendo así a la construcción de edificios más sostenibles y eficientes energéticamente, demostrando que, aunque sea un material simple, puede funcionar de manera bastante sofisticada para crear un ambiente interior saludable y edificaciones más sostenibles.

LA PIRÁMIDE DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Acerca de la pirámide



Figura 5.1 Datos sobre la paja utilizados por la Real Academia Danesa. Traducido por la autora (Real Academia Danesa, 2019).

Paja

| | |
|---|--------------------------|
| Grupo de materiales: | de base biológica |
| Densidad: | 100,00 kg/m ³ |
| Clase de protección contra incendios | E |
| Aislamiento - conductividad térmica (λ): | 0,044 W/km ² |
| Aislamiento - espesor a 0.15W/Km ² | 285 mm |
| Calidad estructural, dimensión a presión de 326kN | |
| Acústica - amortiguación acústica | |
| Toxicidad | |

Posibles impactos ambientales por kg de material (módulos A1-3):

| Categoría de impacto | Impacto | Unidad |
|---|----------|--------------------------|
| Potencial de calentamiento global [GWP] | -1.28E+0 | kg CO ₂ eq/kg |
| Potencial de agotamiento del ozono [ODP] | 3.22E+0 | µg R11 eq/kg |
| Potencial fotoquímico de agotamiento del ozono [POCP] | 2.23E-2 | g Eteno eq/kg |
| Potencial de eutrofización [EP] | 1.01E+0 | g Fosfato eq/kg |
| Potencial de acidificación [AP] | 9.32E-1 | g SO ₂ eq/kg |

Posibles impactos ambientales por m³ de material (módulos A1-3):

| Categoría de impacto | Impacto | Unidad |
|---|----------|--------------------------------------|
| Potencial de calentamiento global [GWP] | -1.28E+2 | kg CO ₂ eq/m ³ |
| Potencial de agotamiento del ozono [ODP] | 3.22E+2 | µg R11 eq/m ³ |
| Potencial fotoquímico de agotamiento del ozono [POCP] | 2.23E+0 | g Eteno eq/m ³ |
| Potencial de eutrofización [EP] | 1.01E+2 | g Fosfato eq/m ³ |
| Potencial de acidificación [AP] | 9.32E+1 | g SO ₂ eq/m ³ |

Fuentes:

| | |
|--|-------------|
| Fuente de impactos ambientales: | Oekobau.dat |
| Datos válidos hasta: | 2019 |
| Fuente de protección contra incendios: | |
| Cualidades estructurales de origen: | |
| Acústica de origen: | |
| Toxicidad en la fuente: | |

CONCLUSIONES

6

El actual y futuro panorama climático plantea graves preocupaciones. La reintroducción de materiales de construcción tradicionales, de origen biológico, empleados durante cientos o miles de años, emerge como una solución sostenible. Estos materiales, de elaboración sencilla y huella de carbono reducida, junto con las adaptaciones tecnológicas, pueden inaugurar un nuevo paradigma en la industria de la construcción. Promover e incentivar al sector de la construcción hacia formas de producción y consumo más responsables, con un enfoque en la circularidad y la utilización eficiente de los recursos, se vuelve un imperativo para seguir edificando sin agotar la capacidad del planeta en los años venideros.

La industria de la construcción genera un altísimo impacto ambiental que ya no puede ser ignorado. La procedencia, producción e impacto de los materiales deben ser cuestionadas y tenidas en cuenta en el proceso de diseño. La mitigación de los efectos del cambio climático y la posibilidad de alcanzar los objetivos fijados por el Acuerdo de París dependen en gran medida de la concienciación de la energía requerida para la fabricación y el transporte de los materiales, así como para la propia construcción y las emisiones de carbono asociadas a estas actividades.

Independientemente de si se utilizan como elemento estructural principal o en combinación con la madera, actuando de forma mixta, las balas de paja ofrecen una amplia gama de posibilidades constructivas. Desde la obra nueva hasta la rehabilitación energética, la paja se presenta como un material sostenible, versátil y con gran potencial de utilización en la arquitectura contemporánea debido a su fácil obtención y rápida producción.

“A medida que el carbono operativo disminuya, el carbono incorporado continuará adquiriendo importancia como una proporción de las emisiones totales. Si bien es preciso seguir enfocados en contrarrestar el carbono operativo, es momento de aumentar nuestros esfuerzos rápidamente para hacer frente a las emisiones de carbono incorporado a escala mundial también.”
(WGBC, 2019)

Sin embargo, resulta fundamental impulsar la normalización y estandarización de los sistemas constructivos con balas de paja para fomentar y difundir su uso y aceptación en diferentes sectores de la industria y de la sociedad. En países donde la construcción con paja está regulada, como Alemania y Francia, es posible encontrar numerosos edificios construidos con este material, tanto en el ámbito público como en el privado.

Por otro lado, en España, donde todavía no existe una normativa específica para la construcción con paja, la adopción de este material en las obras es mucho más común en obras privadas que públicas, dado el riguroso trámite licitatorio que implica este tipo de obras. No obstante, con la construcción del Centro de día para personas dependientes de Meliana, mencionado en el estudio de casos, se espera que la difusión y la incorporación de la paja en este tipo de proyectos aumente en el país, contribuyendo al cambio de paradigma en la industria de la construcción y superando los prejuicios que rodean este material en la sociedad.

En resumen, como se ha demostrado en este estudio, los materiales característicos de la arquitectura tradicional, como la paja, a pesar de su aparente simplicidad, son intrínsecamente sostenibles y ofrecen soluciones altamente efectivas para abordar algunos de los principales desafíos de la construcción moderna, como la transición ecológica y la reducción de la huella de carbono en los edificios.

Por tanto, los materiales de construcción de baja energía incorporada y de origen biológico merecen un lugar central en la arquitectura contemporánea, ya que representan una herramienta valiosa para mitigar el impacto ambiental producido por los edificios y mejorar la comodidad y el bienestar de sus usuarios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7

- Correia, M.; D. Carlos, G.; Mecca, S.; Dipasquale, L. Guillaud, H; Vegas, F.; Mileto, C.; Achenza, M.; Castro, A. (2014). Lessons learned and VerSus Outcomes en M. Correia; L. Dipasquale; S. Mecca (Eds.), Versus: Heritage For Tomorrow: vernacular Knowledge for Sustainable Architecture (pp. 17-19). Firenze University Press.
- Dabaieh, M.; Maguid, D.; El-Mahdy, D. (2022). Circularity in the New Gravity—Re-Thinking Vernacular Architecture and Circularity. *Sustainability*, 14, 328. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su14010328>
- Hu, M. (2023). Exploring Low-Carbon Design and Construction Techniques: Lessons from Vernacular Architecture. *Climate*, 11, 165. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/cli11080165>
- MacDonald, S.O. y Myhrman, M.A. (2007) Edifique con fardos: Una guía paso a paso para la construcción con fardos de Paja. Buenos Aires, Argentina: Nobuko.
- Marincioni, V.; Bradshaw, F. (2023). A long-term monitoring study on the thermal comfort and durability of a straw bale Passivhaus cottage. *E3S Web of Conferences*, 396. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/371660048_A_long-term_monitoring_study_on_the_thermal_comfort_and_durability_of_a_straw_bale_Passivhaus_cottage
- Martinez Sánchez, Faustina. (2017). Nuevas tendencias en la construcción con balas de paja. [Trabajo Final de Grado]. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Minke, G.; Mahlke, F. (2006). Manual de construcción con fardos de paja. Montevideo, Uruguay: Editorial Fin de Siglo.
- Nitzkin, R.; Termens Steiner, M. (2010). Casas de paja: una guía para autoconstructores. España: EcoHabitar.
- Red de Construcción con Paja – RCP (2015). Reglas profesionales de construcción con paja: aislamiento y soporte de revestimiento, reglas CP 2012. Barcelona: Icaria.
- Romans Torres, I. (2014). Estudio y análisis de la construcción con balas de paja. Comparación del sistema estructural CUT con la construcción convencional de H.A. [Trabajo Final de Grado]. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- United Nations Environment Programme (2022). 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi. Disponible en: <https://globalabc.org/our-work/tracking-progress-global-status-report>
- Vegas, F; Mileto, C.; Guimaraens, G.; Navalón, V. (2014) Defining sustainable architecture

en M. Correia; L. Dipasquale; S. Mecca (Eds.), Versus: Heritage For Tomorrow: vernacular Knowledge for Sustainable Architecture (pp. 35-39). Firenze University Press.

World Green Building Council (2022). Hoja de ruta para la descarbonización de la edificación en todo su ciclo de vida. Green Building Council España (GBCe). Disponible en: <https://gbce.es/blog/2022/02/10/green-building-council-espana-presenta-la-hoja-de-ruta-para-la-descarbonizacion-del-sector-de-la-edificacion/>.

World Green Buildin Council (2019). Reducción de las emisiones de carbono: Accion coordinada del sector de la edificación y la construcción para hacer frente a las emisiones de carbono incorporado. Disponible en: https://worldgbc.s3.eu-west-2.amazonaws.com/wp-content/uploads/2022/09/01102803/SPANISH_WorldGBC_Bringing-Embodied-Carbon-Upfront_Executive-Summary_compressed.pdf

Documentación técnica

AlfaWALL. Okambuva Coop. Disponible en <https://www.okambuva.coop/frontpage/alfawall-modulos-prefabricados-de-paja/ficha-tecnica-alfawall/> (consultado 28 julio 2023)

Appendix Strawbale Construction, 2015. Internacional Residential Code (IRC). ICC Digital Codes [en línea]. Disponible en: <https://codes.iccsafe.org/content/IRC2015P3/appendix-s-strawbale-construction> (consultado 20 julio 2023).

Appendix Strawbale Construction, 2018. Internacional Residential Code (IRC). ICC Digital Codes [en línea]. Disponible en: https://codes.iccsafe.org/content/IRC2018P6/appendix-s-strawbale-construction#IRC2018P6_AppxS_SecAS106 (consultado 20 julio 2023).

Appendix Strawbale Construction, 2021. Internacional Residential Code (IRC). ICC Digital Codes [en línea]. Disponible en: <https://codes.iccsafe.org/content/IRC2021P2/appendix-as-strawbale-construction> (consultado 20 julio 2023).

EcoCocon. Disponible en <https://ecococon.eu/es/profesionales/descargas> (consultada 28 julio 2023).

Ecopaja. Disponible en <https://ecopaja.com/sistema-constructivo/> (consultada 28 julio 2023).

Straw Bale Building Guidelines. English language version, 2020. Original title: Strohbaurichtlinie SBR-2019. German Straw Bale Building Association. Disponible en: <https://fasba.de/service/downloads/> (consultado 17 julio 2023).

Residence Jules Ferry. Batiments tout bois/paille 8 niveaux - Label Passiv Haus: Eco-Construction et Ultra Basse Consommation. Disponible en: <https://www.toit-vosgien.com/medias/actualites/0159-JULES%20FERRY/2013-Dossier%20de%20presentation%20de%20la%20Residence%20Jules%20Ferry.pdf> (consultado 28 agosto 2023).

Páginas web

Ajuntament de Meliana. (2023) "El nuevo centro de día de Meliana llevará el nombre de Anna Lluch". Disponible en: <https://www.meliana.es/es/noticia/nuevo-centro-dia-meliana-llevara-nombre-anna-lluch> (consultado 15 agosto 2023)

_____ (2021). Centre de loisirs Jacques Chirac: Les grandes lignes du project. Disponible en: <https://www.rosnysousbois.fr/centre-de-loisirs-jacques-chirac/les-grandes-lignes-du-projet/> (consultado 27 agosto 2023).

CTAV. Ciclo de visitas de arquitectura. (2021) "Centro de Día para personas mayores dependientes: Construcción con paneles prefabricados estructurales de madera con balas de paja de arroz y de trigo". Disponible en: http://arquitectosdevalencia.es/wp-content/uploads/2021/07/dossier_virai.pdf (consultado 15 agosto 2023)

European Union. (2022). "What role do secondary materials play in new constructions and in buildings renovation?". European Circular Economy Stakeholder Platform. Disponible en: <https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/news-and-events/all-events/what-role-do-secondary-materials-play-new-constructions-and-buildings-renovation>

Fresno, M. (2016) "Técnica GREB", Arquiteutu Tecnicu na rede, 29 marzo. Disponible en: <https://arquiteututecnicu.com/2016/03/29/tecnica-greb/> (consultado 25 julio 2023).

HNA. "Centro de día para personas dependientes en Meliana (Valencia)". (2023). Disponible en: <https://www.hna.es/blog/detalle-noticias/4524/centro-de-dia-para-personas-dependientes-en-meliana-valencia> (consultado 15 agosto 2023)

Le Toit Vosgien (2014). SAINT-DIE DES VOSGES - Residence Jules Ferry - Immueble bois de grande hauteur eco-construction et ultra basse consommation. Disponible en: <https://www.toit-vosgien.com/fr/performances-energetiques/immeuble-bois-grande-hauteur.html> (consultado 28 agosto 2023)

López, A. (2010). "La técnica GREB, una ingeniosa alternativa para la autoconstrucción con balas de paja.", Casas de paja, 10 noviembre. Disponible en: <http://casadepaja.es/la-tecnica-greb-una-ingeniosa-alternativa-para-la-autoconstruccion-con-balas-de-paja/> (consultado 25 julio 2023).

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. "El Acuerdo de París" (sin fecha). Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/ca/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contr-el-cambio-climatico/naciones-unidas/elementos-acuerdo-paris.aspx.html> (consultado 02 agosto 2023).

Naciones Unidas. "El Acuerdo de París" (sin fecha). Disponible en: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement> (consultado 2 agosto 2023).

Picard, C. (2021). Jacques Chirac Leisure Center. Disponible en: <https://www.construction21.org/france/case-studies/h/jacques-chirac-leisure-center.html> (consultado 27 agosto 2023)

Organisation for Economic Co-operation and Development - OECD. (2018). "Raw materials use to double by 2060 with severe environmental consequences". OECD. Disponible en: <https://www.oecd.org/environment/raw-materials-use-to-double-by-2060-with-severe-environmental-consequences.htm> (consultado 9 agosto 2023).

Universidad de Burgos. (2022). "Construcción con Paja; edificios pasivos, sanos y naturales" con Javier Sanz [Video]. Youtube. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=902Xyw43rbk&t=3762s> (consultado 09 julio 2023).

LISTADO DE FIGURAS

8

Figura 2.1 Casa Martin Monhart. Autor: Mike Henry (2012). Fuente: The Sustainable Home [en línea]. Disponible en <https://thesustainablehome.net/the-original-nebraska-straw-bale-buildings/> (consultado 11 julio 2023).

Figura 2.2 Casa Feuillette. Autor: Desconocido (1920). Fuente: Austrian Strawbale Network [en línea]. Disponible en <https://baubiologie.at/strohballenbau/maison-feuillette-erstes-europisches-strohballenhaus-3/> (consultado 11 julio 2023).

Figura 2.3 Casa Feuillette. Autor: Desconocido (2014). Fuente: Centre National de la Construction Paille [en línea]. Disponible en <https://cncp-feuillette.fr/galerie-photos/> (consultado 11 julio 2023).

Figura 2.4 Participación de los edificios en las emisiones globales de energía y procesos en 2021. Autor: United Nations Environment Programme (2022). Fuente: Global Status Report for Buildings and Construction (2022).

Figura 2.5 Transformación progresiva del sector para alcanzar la completa descarbonización del parque edificado en 2050. Autor: World Green Building Council (2022). Fuente: Hoja de ruta para la descarbonización de la edificación en todo su ciclo de vida (2022).

Figura 2.6 Construction Material Pyramid. Autor: Real Academia Danesa (2019). Fuente: The Construction Material Pyramid [en línea]. Disponible en <https://materialepyramiden.dk> (consultado 10 julio 2023).

Figura 2.7 Enfoque economía circular. Autor: elaboración propia (2023).

Figura 2.8 Ladrillos de adobe. Autor: Julien Harneis (sin fecha). Fuente: Archdaily en español [en línea]. Disponible en: <https://www.archdaily.cl/cl/776406/el-adobe-de-canela> (consultado 30 agosto 2023).

Figura 2.9 Bambú. Autor: desconocido (sin fecha). Fuente: Depositphotos [en línea]. Disponible en: https://st.depositphotos.com/1835047/1961/i/600/depositphotos_19612365-stock-photo-bamboo.jpg (consultado 30 agosto 2023).

Figura 2.10 Muro de piedra en construcción tradicional en Formentera. Autor: archivo personal (2023).

Figura 3.1 Incremento de la producción de Cultivos Primarios. Autor: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2020). Fuente: Statistical Yearbook – World Food and Agriculture [en línea]. Disponible en <https://www.fao.org/3/CC2211EN/online/CC2211EN.html#> (consultado 14 julio 2023).

Figura 3.2 Principales cultivos primarios producidos a nivel global. Autor: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2020). Fuente: Statistical

Yearbook – World Food and Agriculture [en línea]. Disponible en <https://www.fao.org/3/CC2211EN/online/CC2211EN.html#> (consultado 14 julio 2023).

Figura 3.3 Dimensiones y caras de una bala de paja. Autor: elaboración propia (2023).

Figura 3.4 Casas de paja en Europa. Autor: UP STRAW PROJECT (2021). Fuente: European Straw Building Association [en línea]. Disponible en <https://strawbuilding.eu/strawbale-houses-europe/> (consultado 20 julio 2023).

Figura 4.1 Esquema síntesis de las distintas técnicas de construcción con balas de paja Autor: elaboración propia (2023).

Figura 4.2 Sistema Nebraska: muro portante de balas de paja. Autora: Maren Termens (2007). Fuente: Nitzkin, R.; Termens Steiner, M. (2010). Casas de paja: una guía para autoconstructores. España: EcoHabitar.

Figura 4.3 Sistema CUT. Autora: Maren Termens (2010). Fuente: Nitzkin, R.; Termens Steiner, M. (2010). Casas de paja: una guía para autoconstructores. España: EcoHabitar

Figura 4.4 Sistema GREB. Autor: elaboración propia (2023).

Figura 4.5 Sistema de postes y vigas. Autor: elaboración propia (2023).

Figura 4.6 Módulos prefabricados. Autor: elaboración propia (2023) a partir de ilustración de Brandon Meléndez.

Figura 4.7 Sistema de aislamiento térmico por el exterior de paja. Autor: elaboración propia (2023).

Figura 4.8 Fachada principal. Autor: Milena Villalba (2023). Fuente: HNA [en línea]. Disponible en: <https://www.hna.es/blog/detalle-noticias/4524/centro-de-dia-para-personas-dependientes-en-meliana-valencia> (consultado 15 agosto 2023).

Figura 4.9 Axonometría del programa. Autor: equipo de proyecto (sin fecha). Fuente: HNA [en línea]. Disponible en: <https://www.hna.es/blog/detalle-noticias/4524/centro-de-dia-para-personas-dependientes-en-meliana-valencia> (consultado 15 agosto 2023).

Figura 4.10 Patio interior. Autor: desconocido (sin fecha). Fuente: Ayuntamiento de Meliana [en línea]. Disponible en: <https://www.meliana.es/es/noticia/nuevo-centro-dia-meliana-llevara-nombre-anna-lluch> (consultado 15 agosto 2023).

Figura 4.11 Interior del edificio en fase de construcción. Autor: equipo de proyecto (sin fecha). Fuente: CTAV. Ciclo de visitas de arquitectura. (2021) [en línea]. Disponible en: http://arquitectosdevalencia.es/wp-content/uploads/2021/07/dossier_virai.pdf (consultado 15 agosto 2023).

Figura 4.12 Módulos prefabricados en taller, aún sin el relleno de paja. Autor: equipo de

proyecto (sin fecha). Fuente: CTAV. Ciclo de visitas de arquitectura. (2021) [en línea]. Disponible en: http://arquitectosdevalencia.es/wp-content/uploads/2021/07/dossier_virai.pdf (consultado 15 agosto 2023).

Figura 4.13 Fachada sur: paño acristalado con protección solar. Autor: desconocido (sin fecha). Fuente: Construction 21 France (2021) [en línea]. Disponible en: <https://www.construction21.org/france/case-studies/h/jacques-chirac-leisure-center.html> (consultado 27 agosto 2023).

Figura 4.14 Muros de carga de paja en ejecución. Autor: desconocido (sin fecha). Fuente: Construction 21 France (2021) [en línea]. Disponible en: <https://www.construction21.org/france/case-studies/h/jacques-chirac-leisure-center.html> (consultado 27 agosto 2023).

Figura 4.15 Interior del edificio. Autor: desconocido (sin fecha). Fuente: Construction 21 France (2021) [en línea]. Disponible en: <https://www.construction21.org/france/case-studies/h/jacques-chirac-leisure-center.html> (consultado 27 agosto 2023).

Figura 4.16 Sección transversal. Autor: equipo de proyecto (sin fecha). Fuente: Construction 21 France (2021) [en línea]. Disponible en: <https://www.construction21.org/france/case-studies/h/jacques-chirac-leisure-center.html> (consultado 27 agosto 2023).

Figura 4.17 Bloque de 7 plantas, fachada sur. Autor: desconocido (sin fecha). Fuente: ASP Architecture [en línea]. Disponible en: <https://asparchitecture.fr/projets/residences-j-ferry-8-niveaux-bois-paille-passif/> (consultado 27 agosto 2023).

Figura 4.18 Interior de una de las viviendas. Autor: desconocido (sin fecha). Fuente: ASP Architecture [en línea]. Disponible en: <https://asparchitecture.fr/projets/residences-j-ferry-8-niveaux-bois-paille-passif/> (consultado 27 agosto 2023).

Figura 4.19 Esquema de fijación de las cajas de aislamiento y del revestimiento exterior. Autor: desconocido (sin fecha). Fuente: ASP Architecture [en línea]. Disponible en: <https://asparchitecture.fr/projets/residences-j-ferry-8-niveaux-bois-paille-passif/> (consultado 27 agosto 2023).

Figura 4.20 Esquema de la caja prefabricada rellena con paja. Autor: desconocido (sin fecha). Fuente: ASP Architecture [en línea]. Disponible en: <https://asparchitecture.fr/projets/residences-j-ferry-8-niveaux-bois-paille-passif/> (consultado 27 agosto 2023).

Figura 4.21 Detalle constructivo dintel/balcón última planta. Autor: desconocido (sin fecha). Fuente: ASP Architecture [en línea]. Disponible en: <https://asparchitecture.fr/projets/residences-j-ferry-8-niveaux-bois-paille-passif/> (consultado 27 agosto 2023).

Figura 5.1 Datos sobre la paja en la pirámide de materiales de construcción. Autor: Real Academia Danesa (2019). Fuente: The Construction Material Pyramid [en línea]. Disponible en <https://materialepyramiden.dk> (consultado 10 julio 2023).