

CONSTRUCCIÓN PREFABRICADA EN PAJA EN ESPAÑA



INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

MESTRADO INTEGRADO EM ARQUITETURA E
URBANISMO

Ivo Rivero Villar

Universidade Portucalense
Porto
Outubro 2021

CONSTRUCCIÓN PREFABRICADA EN PAJA EN ESPAÑA



INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

MESTRADO INTEGRADO EM ARQUITETURA E
URBANISMO

Ivo Rivero Villar

ORIENTADORES

Prof. Doutora Ana Lima

Prof. Especialista Luís Paulo Pacheco

Porto

Outubro 2021

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis tutores su apoyo y dedicación, no solo durante la investigación, sino también anteriormente como profesores durante la carrera.

También agradecer tanto a mi familia como a mis amigos el apoyo a lo largo de toda mi formación, dedicando su tiempo y esfuerzo, para que pueda estar redactando como parte última de este trabajo los agradecimientos.

RESUMO

O objetivo desta dissertação de obtenção do grau de mestre é a construção com palha pré-fabricada, levantando questões relacionadas com os diferentes sistemas construtivos em palha e a sua possível adaptação em Espanha às condições galegas.

A nível internacional, a construção em palha é um campo de estudo explorado, onde se destaca a escassez de investigação a nível espanhol e mais especificamente galego.

Busca, através da análise e comparação dos diferentes sistemas construtivos em palha, encontrar a opção mais adequada para o projeto arquitetónico de acordo com as características da proposta. Além disso, de forma a conseguir uma implementação ideal do sistema, serão propostos os detalhes construtivos orientativos derivados do estudo prévio das características físicas do material, soluções comerciais e literatura existente sobre o assunto.

Como objetivos da investigação, é efetuado um catálogo dos principais sistemas de construção em palha em Espanha e a definição dos pormenores construtivos do sistema pré-fabricado em palha para o adaptar de forma adequada à construção na Galiza.

A metodologia baseia-se essencialmente num estudo de caso múltiplo de carácter comparativo, com o objetivo de recolher o máximo de informação possível sobre os projetos construídos em Espanha e assim poder comparar as suas características.

Deste modo, será efetuada uma análise comparativa que permitirá conhecer a influência do sistema construtivo na arquitetura do projeto e propor os pormenores construtivos adequados às especificidades climáticas da Galiza.

A pesquisa realizada nesta dissertação verifica que é possível utilizar a palha como principal material em projetos de arquitetura na Galiza. Testar o sistema de módulos pré-fabricados de palha e madeira como um sistema de construção adequado.

Palavras chave: fardo de palha, painel pré-fabricado, Galiza.

RESUMEN

El objeto de esta disertación de obtención del grado de maestría es la construcción con prefabricados en paja, planteando preguntas relacionadas con los diferentes sistemas constructivos en paja y su posible adaptación en España a los condicionantes gallegos.

A nivel internacional las construcciones con paja son un ámbito de estudio explorado, en el que se destaca la carencia de investigación a nivel español y más concretamente en el gallego.

Se busca, mediante el análisis y comparación de los diferentes sistemas constructivos en paja, encontrar la opción más adecuada para el proyecto de arquitectura según las características de la propuesta. Además, para conseguir una implementación óptima del sistema, se propondrán los detalles constructivos orientativos derivados del estudio previo de las características físicas del material, soluciones comerciales y literatura existente al respecto.

Como objetivos de la investigación, se lleva a cabo un catálogo de los principales sistemas de construcción con paja en España y la definición de detalles constructivos del sistema de prefabricado de paja para adaptarlo de forma adecuada a la construcción en Galicia.

La metodología se basa principalmente en un estudio de caso múltiple con una naturaleza comparativa, con el objetivo de recabar toda la información posible de proyectos contruidos en España y así poder comparar sus características.

De esta forma, se realizará un análisis comparativo que aporte conocimiento sobre la influencia del sistema constructivo en la arquitectura del proyecto y se propondrán los detalles constructivos adecuados para las especificidades climáticas de Galicia.

La investigación llevada a cabo en esta disertación verifica que es posible la utilización de la paja como material principal en proyectos de arquitectura en Galicia. Probando el sistema de módulos prefabricados de paja y madera como sistema constructivo idóneo.

Palabras clave: fardo de paja, panel prefabricado, Galicia.

ABSTRACT

The object of this dissertation to obtain the master's degree is the construction with prefabricated straw, raising questions related to the different construction systems in straw and their possible adaptation in Spain to Galician conditions.

At an international level, straw construction is an explored field of study, which lacks research at the Spanish level and more specifically in the Galician one.

It seeks, through the analysis and comparison of the different straw construction systems, to find the most suitable option for the architecture project according to the proposal characteristics. In addition, in order to achieve an optimal implementation of the system, guiding construction details will be proposed derived from the previous study of the physical characteristics of the material, commercial solutions and existing literature on the matter will be proposed.

As objectives of the research, a catalogue of the main straw construction systems in Spain and the definition of construction details of the prefabricated straw system is carried out to adapt it appropriately to construction in Galicia.

The methodology is mainly based on a multiple case study with a comparative nature, with the aim of collecting as much information as possible on projects built in Spain and thus being able to compare their characteristics.

In this way, a comparative analysis will be carried out providing knowledge about the influence of the construction system on the architecture of the project and the appropriate construction details for the climatic specificities of Galicia will be proposed.

The research carried out in this dissertation verifies that it is possible to use straw as the main material in architecture projects in Galicia. Testing the system of prefabricated straw and wood modules as an ideal construction system.

Key Words: straw bale, prefabricated panel, Galicia.

ÍNDICE

Agradecimientos

Resumo

Resumen

Abstract

Índice

1	Introducción.....	1
1.1	Contextualización de la Investigación.....	2
1.2	Justificación de la Problemática.....	3
1.3	Objetivos de la Investigación	4
1.4	Estado del Arte.....	5
1.5	Metodología de Investigación	9
1.6	Estructura de los Contenidos	11
2	Marco Teórico	14
2.1	La Paja Como Material Constructivo.....	15
2.1.1	Origen de las Construcciones Vegetales Y Especies Utilizadas	15
2.1.2	Historia Reciente de la Paja.....	24
2.1.3	Sistemas Constructivos con Fardos de Paja	32
2.1.4	Técnicas Contemporáneas con Paja	45
2.1.5	Potencialidad de la Paja.....	52
2.1.6	Cualidades Físicas de la Paja.....	61
2.1.7	Características Específicas de los Prefabricados de Paja y Madera	77
2.2	Estructura Productiva y de Distribución en España de los Prefabricados.....	84
2.2.1	Características de las Soluciones Comerciales.....	89
3	Sistemas Constructivos en Uso en España.....	96
3.1	Sistema Muros Portantes o Sistema Nebraska	100
3.2	Sistema de Postes y Vigas o de Relleno	104
3.3	Sistema CUT	110
3.4	Prefabricado	114
3.5	Análisis Comparativo de los Sistemas Constructivos	121
4	Detalles Constructivos Adecuados al Clima Gallego.....	133
4.1	Aspectos Físicos a Tener en Cuenta:	136
4.1.1	Control de la Temperatura	136
4.1.2	Humedad.....	143
4.1.3	Protección contra el fuego	148
4.1.4	Aislamiento acústico	150
4.2	Detalles de la Envolvente.....	151
5	Sistematización de Datos y Consideraciones Finales	159
	Referencias Bibliográficas.....	165
	Índice de Imágenes.....	172
	Índice de Tablas	177



Figura 1. Escultura de Paja, Cambridgeshire, Inglaterra (Studio Morison, 2021).

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Contextualización de la Investigación

1.2 Justificación de la Problemática

1.3 Objetivos de la Investigación

1.4 Estado del Arte

1.5 Metodología de Investigación

1.6 Estructura de los Contenidos

1.1 CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La construcción en paja surge como una necesidad constructiva que se resuelve con un material abundante y extendido. Desde el principio de la humanidad la paja ha sido un material escogido en diferentes puntos aislados para la construcción, debido a sus características aislantes, su durabilidad y abundancia como subproducto de la agricultura.

A medida que la mano de obra se encarece y la construcción se estandariza, especialmente durante la revolución industrial, entra en desuso siendo sustituido por materiales más estandarizados. No es hasta mediados del siglo XIX con la invención de la embaladora que resurge su uso. Se crea así el Estilo Nebraska, caracterizado por la utilización de fardos de paja para crear muros de carga (Nitzkin & Termens, 2010, pág. 29).

Este uso va en aumento y se expande por el resto del mundo, teniendo constancia de la primera casa de paja en Europa en Montargis, Francia, en 1921 (Nitzkin & Termens, 2010), proyecto que hace uso de una estructura de madera. Este sistema híbrido de paja y madera sigue en uso actualmente, ya que simplifica el cálculo estructural permitiendo ser usado con normativas que no contemplen la paja como elemento estructural y eliminando la compresión natural de la paja.

En 1998 se funda la European Straw Building Association con la finalidad de cooperar, intercambiar y comunicar la información sobre la construcción en paja. En 2005 surge la Red de Construcciones en Paja, para agrupar a la comunidad hispano-parlante.

Poco a poco se han ido creando asociaciones enfocadas a potenciar el uso de la paja, consiguiendo un desarrollo de normativa específica en países como Francia, Alemania, Estados Unidos, Canadá, ... pero todavía quedan muchos otros, como España, en los que está permitido su uso, pero no existe un marco legal específico ni incentivos administrativos.

1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Las construcciones con paja, a pesar de tener muchos exponentes en países cercanos a España, como puede ser Francia, Suiza o Inglaterra, son poco numerosas en el país. Existe una falta general de experiencia e inversión debido a la gran inercia que existe en el sector de la construcción, lo cual dificulta la implementación de la paja como material constructivo en cualquiera de los sistemas en los que es usada.

Los módulos prefabricados de paja, que permiten una construcción adecuada a las exigencias actuales del sector, se limitan en fabricación únicamente a la costa mediterránea y puntualmente al País Vasco.

Estas complejidades han hecho que la gran parte de los proyectos y organizaciones que hacen uso de la paja se centren en la construcción con fardos de paja. Esto se debe a que la barrera de entrada a la construcción con fardos es mucho menor, sin necesidad de la infraestructura productiva.

Este método constructivo, al ser tan intenso en mano de obra, supone una tendencia hacia la autoconstrucción. Lo que en muchos casos ocasiona que se prescinda del proyecto de arquitectura y se limite mucho su uso.

En el caso concreto de Galicia, no se ha sido posible encontrar ninguna iniciativa de este tipo, lo que implica que no existan grupos de formación ni ejemplo constructivo de la construcción con la paja, requiriendo por tanto el desplazamiento a otras comunidades.

El campo de la construcción con paja, y más concretamente de los prefabricados, está poco explorado en España, especialmente en el territorio gallego.

Es por tanto necesario el estudio de este tema para poder facilitar el uso de la paja, encontrando la forma óptima de su utilización, y permitiendo su utilización asociada a los Proyectos de Arquitectura. Buscando poder aumentar la calidad proyectual en aquellas edificaciones por las que se opte por este material, sin que ello implique únicamente la autoconstrucción y la prescindencia de la arquitectura.

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo principal de la investigación es la búsqueda del sistema constructivo con paja más adecuado para la construcción actual y el establecimiento de una serie de recomendaciones que puedan servir como guía a la hora de diseñar una vivienda en Galicia, teniendo en cuenta las diferentes características constructivas y las exigencias proyectuales.

Para llevar a cabo la investigación, y siguiendo las metodologías establecidas en el apartado 1.4 de este trabajo, se destacan los siguientes objetivos concretos con la intención de guiar la investigación:

Definir un catálogo de los principales sistemas de construcción con fardos de paja y técnicas contemporáneas con paja en España.

Se llevará a cabo un catalogo nacional, seleccionando proyectos de los diferentes sistemas constructivos con fardos de paja con el objetivo de realizar un estudio multicaso comparativo sobre las diferentes características de cada uno de ellos. De esta forma se pretende poder comparar su influencia y la adecuación para un proyecto según las necesidades proyectuales.

Definir los sistemas de construcción y los detalles constructivos que mejor se adaptan a la construcción de paja en Galicia.

Mediante un análisis de las diferentes características técnicas que deben ser tenidas en cuenta a la hora de diseñar una vivienda construida en paja, se establecen una serie de recomendaciones que permitan un uso óptimo del material.

1.4 ESTADO DEL ARTE

En cuanto al territorio español, la mayor parte de publicaciones son alrededor de grupos profesionales. La Red de Construcción en Paja (RCP), fundada en el 2005, reúne a gran parte de los constructores del territorio. Su misión es promover, recopilar, crear y conectar todo y a todos los relacionados con este tipo de construcciones (Red de Construcción con Paja, 2021).

Esta asociación, que es una de las principales agrupaciones de profesionales, lleva a cabo una labor muy importante de apoyo y divulgación de los conocimientos alrededor de la construcción con fardos de paja. En ella se pueden encontrar todo tipo de información sobre proyectos de viviendas construidos con balas de paja y en su mayoría en autoconstrucción, desde cómo llevarlos a cabo a como es el proceso de legalización.

En el año 2002, surgió el Taller Karuna, con la arquitecta Patricia Cebada especializada en bioconstrucción con fardos de paja a la cabeza, con la misión de ayudar en la autoconstrucción y a trabajar en la bioconstrucción (Taller Karuna Casa de Paja, 2021). En él se ofrecen cursos de autoconstrucción detallados sobre la autoconstrucción con balas de paja. Este grupo además forma parte de los profesionales de la RCP.

La cooperativa Okambuva dedicada a la bioconstrucción es la primera empresa española en desarrollar paneles prefabricados en paja para la construcción *Alfawall* (Okambuva.coop, 2021), siendo estos además proyecto *open source*, a pesar de ello la mayoría de proyectos son de construcción con fardos.

En cuanto a literatura e investigaciones existen varios textos al respecto. Comenzando por Gustave Lamache (1921), escribe la primera publicación en Europa que habla sobre la construcción con fardos de paja. Lloyd Kahn (1979) explica en su libro el surgimiento de las construcciones con fardos de paja y el Estilo constructivo Nebraska.

En castellano se encuentra el libro de Nitzkin y Termens (2010), donde describen todas las técnicas constructivas con balas de paja de forma minuciosa, con una breve introducción histórica y legal, enfocándose siempre en el punto de vista de la autoconstrucción en España.

En relación a Portugal ha sido realizada, por Gonçalves Lopes (2018), una *Dissertação* basada en una aproximación al estado del arte en Portugal y una propuesta de proyecto de unidad habitable.

En cuanto a libros que expliquen de una forma más detallada el proceso constructivo se encuentran varios ejemplares, la mayoría enfocados a la construcción con fardos de paja.

Myrman y MacDonald (1997) explican en profundidad todo el proceso constructivo con fardos de paja y cada uno de sus detalles en su libro *Build it with Bales*. Murray Hollis (2005), redacta una guía práctica de construcción con balas de paja enfocada a profesionales, *Réseau Français de la Construction en Paille* (2016) publica una guía más técnica de buenas prácticas a la hora de construir en paja. Ambas nos explican cómo es el proceso constructivo en otros países desde una óptica profesional.

Con un enfoque más técnico existen varios ejemplos de publicaciones sobre fardos de paja. En el libro *Das S-House* (Wimmer, Gruppe Angepaste Technologie, & TU Wien) se habla sobre la construcción actual con fardos de paja incluyendo varios ejemplos. *Practical Straw Bale Building*, escrita por Murray Hollis (2005), es una guía práctica de construcción con fardos.

Minke y Mahlke (2006), realizan una guía de la construcción con fardos de paja que además incluye diversos proyectos entre los que se incluye un ejemplo de prefabricados de paja.

En el ámbito científico encontramos la investigación de Carbone (2003) en la cual realiza un análisis científico muy minucioso de las cualidades de la paja como material constructivo y sus oportunidades de futuro en el mercado como aislante. Ashour y Wu (2011) realizan un análisis de los beneficios de la construcción con paja y de las cualidades que la hacen apta para la construcción, además también analizan la construcción con tierra y paja.

Específicamente sobre prefabricados Cristopher Gross (2009), en su tesis doctoral, hace un análisis minucioso de los prefabricados en paja, de sus características técnicas y de cómo pueden mejorarse para cumplir con funciones portantes haciéndolos ser parte de la estructura de carga en viviendas.

Lopez y Iborra (2015) analizan las características de los prefabricados de paja, centrándose además en el estándar open source “*Alfawall*” desarrollado por Okambuva.

Se testea la resistencia de los paneles prefabricados, tanto en *Racking shear resistance of prefabricated Straw-bale panels* (Lawrence, Drinkwater, Heat, &

Walker, 2009), desarrollado por la universidad de Bath. Como en la investigación de Ash y Aschleim (2003), donde se tienen en cuenta diferentes variantes sobre materiales y detalles de refuerzos.

El comportamiento térmico de viviendas en paja se estudia en el estudio de Carol Atkinson (2008), quien hace un análisis práctico de una vivienda construida en paja. Se estudia tanto el desempeño térmico de la vivienda como la demanda energética necesaria.

Sobre otras técnicas modernas de construcción con paja y otros materiales similares se encuentran varios libros guía sobre su uso y su fabricación. Stanwix y Sparrow (2014), y Magwood (2016), son guías desarrolladas sobre la reciente técnica del cemento de cáñamo. Sobre el mismo tema encontramos una investigación sobre el material y sus cualidades realizada por Ronchetti (2007).

A nivel de empresas que se dedican a la construcción con paja en España tenemos a EcoPaja GreenBuilding del País Vasco, es la única que se especializa únicamente en la construcción de prefabricados de paja en España (EcoPaja Green Building, 2021) y sus proyectos no son demasiado numerosos. Aun así, posee un registro fotográfico y documental de algunas de las construcciones en las que han participado.

EcoCocon es una de las empresas más importante a nivel internacional de prefabricados de paja, la cual dispone de documentación general de cómo funciona su sistema constructivo y en especial la *Building Phisics Guide*, *Building Elements* y *Reaction to Fire and Fire Resistance*, los cuales nos permiten conocer a fondo ciertos aspectos fundamentales de los prefabricados (EcoCocon, 2021).

Se puede observar por tanto en el estado del arte que existen bastantes publicaciones en cuanto a la construcción con balas de paja, las del territorio español suelen estar relacionadas con la autoconstrucción, en el caso gallego existe una falta total, tanto de proyectos como de empresas dedicadas al sector.

Se destaca la existencia de diversas investigaciones en cuanto al uso de la paja, siendo fácilmente accesibles ensayos sobre las diferentes técnicas constructivas con paja.

1.5 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Para poder responder a los objetivos de la propuesta se pretende llevar a cabo principalmente una metodología de Estudio de Caso Múltiple de Naturaleza Comparativa. La investigación se centra en la construcción con fardos de paja y prefabricados a nivel español, reuniendo toda la información disponible de los ejemplos ya construidos y de los detalles constructivos disponibles, para así poder analizarlos en profundidad con un ánimo de “exploración” (De Bruyne, Herman, & De Schoutheete, 1991) que pueda facilitar información y conclusiones útiles.

Los estudios de caso se seleccionarán en función de sus características constructivas y arquitectónicas, debiendo ser estos siempre destinados a vivienda, haber sido construidos en un período de tiempo relativamente reciente y tener disponible suficiente información como para ser analizados. Este último punto implica localizar planos de planta y alzados, algún tipo de pormenor constructivo o en su defecto suficiente información gráfica como para comprender el edificio. Se hará un análisis comparativo entre todos ellos de morfología, orientación, aperturas exteriores y cualquier otro punto que se considere relevante durante la investigación.

En un primer momento se realizará una recogida de datos basado en el Análisis Documental (Albarelló, y otros, 1997) con una recogida de información de fuentes tales como libros, artículos informativos, publicaciones y otras. Esta recogida de información provendrá de fuentes documentales oficiales, como la RCP (Red de Construcción con Paja) como de fuentes no oficiales como son los diferentes grupos privados que aglutinan información de proyectos realizados en paja en España.

Para completar la recogida de información se recurrirá a la Observación Estructurada, permitiendo analizar de forma crítica los proyectos ya realizados (Gil, 1995). La Observación, permite la recogida de datos pertinentes que permiten verificar hipótesis a posteriori (Quivy & Campenhoudt, 1992). Esta observación tomará forma de catálogo. Para llevarla a cabo se utilizarán técnicas de registro. Tanto la fotografía como las notas de campo (Bodgan & Biklen, 1994), sirviendo como soporte del diagnóstico de los forman parte de un estudio cualitativo.

Finalmente, el análisis se basará en la comparación de las características recopiladas (Quivy & Campenhoudt, 1992), las cuales permitirán comparar unas viviendas con otras para poder realizar una interpretación de los datos además de un análisis exhaustivo de los detalles constructivos. La

presentación de los datos se realizará a través de fichas y de esquemas que permitan comprender con facilidad los atributos de las construcciones, así como el funcionamiento de los detalles.

En un segundo momento se realizará un Análisis Documental de libros, imágenes y publicaciones con respecto a las diferentes soluciones para el diseño adecuado de una edificación construida con prefabricados de paja.

De esta forma se realizará un análisis comparativo que aporte conocimiento sobre la influencia del sistema constructivo en la arquitectura del proyecto y se propondrán los detalles constructivos adecuados para las especificidades climáticas de Galicia.

1.6 ESTRUCTURA DE LOS CONTENIDOS

Para dar respuesta a los objetivos de la investigación este documento se estructura en 5 puntos principales:

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

Es el capítulo introductorio, tiene como objetivo la presentación del trabajo. Exponiendo la contextualización del estudio, la problemática, los objetivos de la investigación, la metodología a seguir en el trabajo y la estructura de los contenidos.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

Se desarrolla toda la investigación sobre la paja como material constructivo, así como la estructura productiva de los prefabricados en España. Se hace necesario para el trabajo la investigación a fondo de la historia de la paja, las diferentes técnicas constructivas con fardos de paja y las características de la paja y prefabricados como material constructivo.

CAPÍTULO III SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN USO EN ESPAÑA

Principalmente busca responder al primer objetivo de la investigación, mediante el análisis de diversos casos de estudio y la comparativa de sus características, y permite llegar a las conclusiones y al conocimiento sobre los diferentes sistemas constructivos con fardos de paja.

CAPÍTULO IV DESTALLES CONSTRUCTIVOS ADECUADOS AL CLIMA GALLEGO

Respondiendo al segundo objetivo, y basándose en las conclusiones del capítulo anterior, se hace una relación entre los aspectos físicos de la paja analizados en el marco teórico para proponer unas guías orientativas para el correcto diseño de una edificación con prefabricados de paja en el clima gallego.

CAPÍTULO V SISTEMATIZACIÓN DE DATOS Y CONSIDERACIONES FINALES

En este apartado se hace una recapitulación de todo el trabajo realizado y de cómo responde de manera concreta a los objetivos propuestos por esta investigación.



*Figura 2. Escuela en Paja, Malawi, África
(Karim, 2021).*

2 MARCO TEÓRICO

2.1 La Paja Como Material Constructivo

2.1.1 Origen de las Construcciones Vegetales y Especies Utilizadas

2.1.2 Historia Reciente de la Paja

2.1.3 Sistemas Constructivos con Fardos de Paja

2.1.4 Técnicas Contemporáneas con Paja

2.1.5 Potencialidades de la Paja

2.1.6 Cualidades Físicas de la Paja

2.1.7 Características Específicas de los Prefabricados de Paja y Madera

2.2 Estructura Productiva y de Distribución en España de los Prefabricados

2.2.1 Características de las Soluciones Comerciales

2.1 LA PAJA COMO MATERIAL CONSTRUCTIVO

Para poder responder a la problemática propuesta en este trabajo primero se debe comprender como y cuando surge el uso de este material, como se desarrolla su uso a lo largo del tiempo y el cómo y el porqué de su uso actual.

2.1.1 ORIGEN DE LAS CONSTRUCCIONES VEGETALES Y ESPECIES UTILIZADAS

Desde sus inicios el ser humano ha buscado siempre un lugar donde resguardarse de las injerencias del tiempo. Iniciando su camino en cuevas naturales, que cumplían con las exigencias mínimas, transforma su vivienda de forma progresiva, según sus necesidades, en chozas de barro o tiendas de pieles, mejorando sus características hasta llegar a las edificaciones actuales.

Así, las tipologías, las técnicas y los materiales van variando en el tiempo y en los diferentes lugares debido a cambios en el clima, diferentes necesidades o diferencias geográficas.

Lo que se mantiene en común en las diferentes poblaciones a lo largo de la historia es el uso de los materiales vegetales, implicando una evolución convergente en las edificaciones tradicionales. Estas hacen siempre uso de las diferentes especies vegetales disponibles en cada región debido a sus características especiales que las diferencian de cualquier otro material inerte.

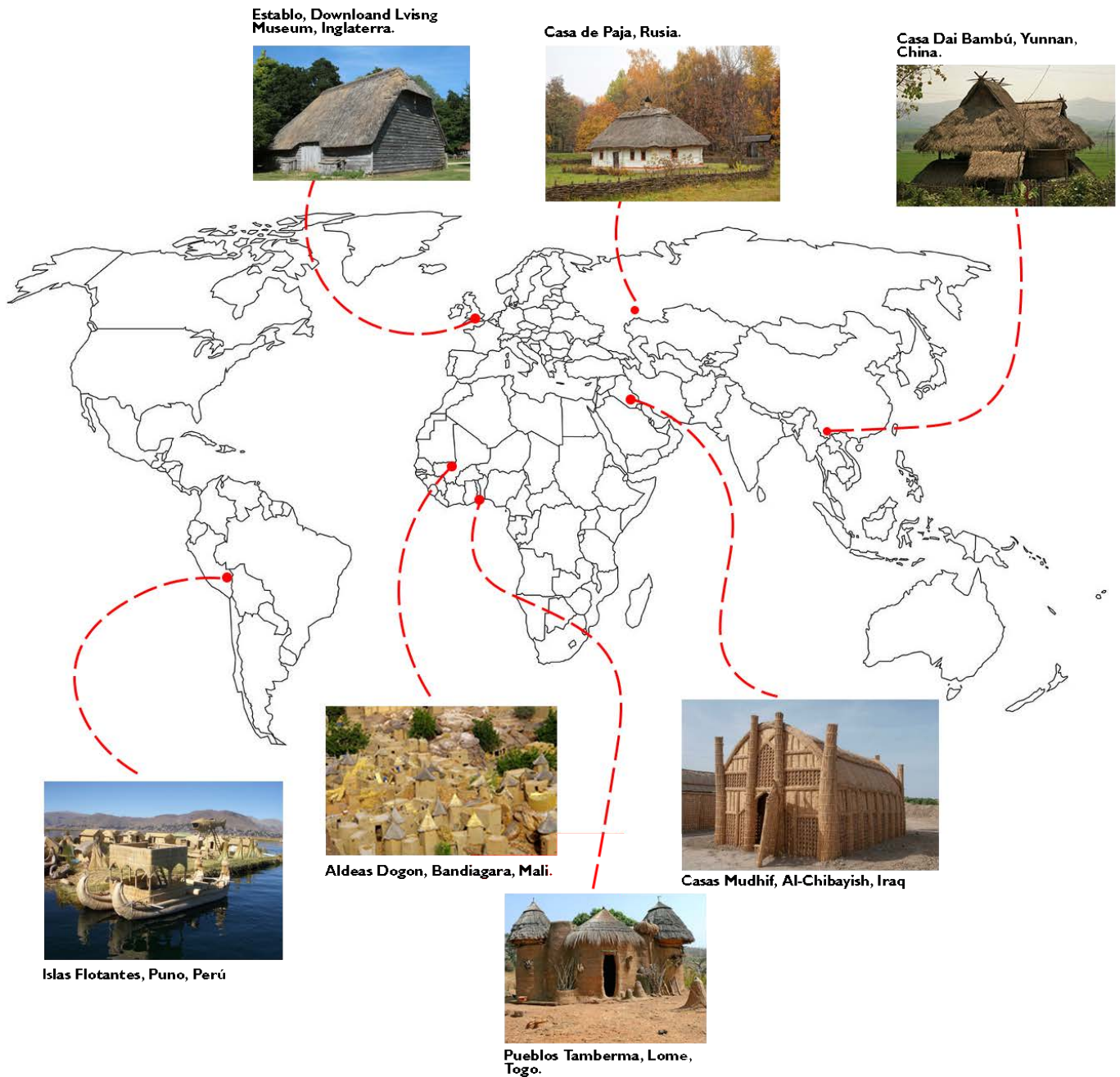


Figura 3. Mapamundi Ejemplos Construcciones en Paja (Autor).

Los materiales vegetales son muy utilizados en general por sus propiedades de resistencia y flexibilidad, las cuales son aportadas por sus fibras internas. Las variedades usadas de forma común alrededor del mundo son la Madera, Palma, Junco, Bambú, Cáñamo y la Paja.

Tabla 1 – Variedades de Plantas Cultivadas por sus Fibras, Ordenadas por su Localización de las Fibras en la Planta.

Fibra de Líber En Tallo	Otras Plantas de Fibra en Tallo	Fibra en Hoja	Fibra en Semillas/Flores	Otros Cultivos (Paja como Residuo)
Linaza	Esparto	Abacá	Algodón	Avena
Cáñamo Verdadero (Cannabis Sativa)	Arundo	Agave	Ceiba	Trigo
Kenaf (Hibiscus Cannabinus)	Bagazo (Caña de azúcar)	Platanera	Bonote (Coco)	Arroz
Ramio	Bambú			Centeno
Yute	Maíz			Lúpulo
	Sabai			Cebada
	Madera			

Las plantas están compuestas por diferentes tipos de células, las células meristemáticas son células que están constantemente sufriendo mitosis y división celular, una vez ocurrido este proceso se transforman en tres tipos diferentes de células. Pueden convertirse en colénquimas o parénquimas, que siguen vivas una vez alcanzada su madurez funcional, o en esclerénquimas, las cuales debido a su engrosamiento y endurecimiento de las paredes celulares mueren al alcanzar la madurez. Las fibras vegetales útiles son las paredes de las células esclerénquimas, cuya función principal es sostener y proteger la planta y por tanto engrosan sus paredes secundarias (Carbone, 2003).

Junco:

El junco (género *Juncus*), son plantas de la familia de las *Juncáceas*, comunes en el mediterráneo, África y América. Engloba más de 225 especies y se caracterizan por tener una altura habitual de 90cm, crecer en zonas húmedas a orillas de ríos y lagos, sus hojas son cilíndricas, rectas y flexibles.

El junco se ha empleado en diversas áreas rurales como almacén, paredes y cubiertas. Es un material aislante, ligero, fácil de trabajar y no es necesario procesarlo. Como desventaja tiene que es inflamable y poco duradero.

Uno de sus mayores exponentes son las construcciones de Iraq, los *mudhifs*. Esta técnica se remonta unos 6000 años en el pasado, haciendo uso de la variedad de junco gigante (*fragmites communis*) de los ríos Tigris y Éufrates, la cual crece hasta los 7m de altura (Kahn, 1979). Para ello se corta y agrupa el junco en haces, los cuales se clavan en el suelo en dos líneas paralelas atando sus extremos creando arcos. Después se sujeta una armadura horizontal y sobre ella esteras que cierran las paredes.



Figura 4. Mudhif Iraq (Mompó García, 2021).

Bambú:

Durante años en la taxonomía el bambú se ha considerado un árbol, pero debido a los avances en la genética esta planta se clasifica dentro de la familia de las gramíneas (*Poaceae*), en la cual se incluyen otras especies como el trigo. Esto hace que comparta cierta estructura, aunque más rígida, con la paja común. Perteneciendo además a la subfamilia de las *Bambusoideas*.

El tallo de esta planta se conoce con el nombre de culmo, siendo leñoso y dividido por anillos y partes huecas. Su forma de crecimiento son los rebrotes de un tallo subterráneo creando grupos ramificados. Cada brote tarda de 3 a 5 años en alcanzar la madurez y puede llegar a crecer a una velocidad de 12cm diarios. Generalmente solo se desarrolla en climas templados (Carbone, 2003).

El uso del bambú en la construcción se concentra en Oriente, donde se usan actualmente casi 2 millones de toneladas de este material para la construcción de viviendas. Las características que lo hacen adecuado para la construcción son su ligereza y su elasticidad, poseyendo una relación fuerza-peso mayor al acero.

Como usos en la construcción encontramos que es apto para columnas y vigas, pilotes de cimentación hincados en el suelo, el uso del culmo como paneles para la fabricación de tableros y parquet (Rodriguez Romo, 2006), como material de andamiaje (Occupational Safety and Health Branch, Labor Department, 2017) y en sustitución del acero del hormigón armado (Sevalia, Siddhpura, Agrawal, Shah, & Kapadia, 2013).



Figura 5. Andamiaje de Bambú en Hong Kong (Lynch, 2016).



Figura 6. Casa Sharma Springs, Indonesia (IBUKU, 2012).

Cáñamo:

La planta del cáñamo es un miembro de la familia *Cannabaceae* la cual produce fibras leñosas suaves. Originaria de Asia Central lleva cultivándose por sus fibras desde el 2800 a.C., fue cultivada más tarde en el Mediterráneo durante la Edad Media. Fue una de las primeras plantas cultivadas por el ser humano (O'Down & Quinn, 2005).

Hasta el 1800s el principal uso del cáñamo (también llamado *Cannabis*) era para producir cuerdas, telas, aceite y productos medicinales. Actualmente también se le añaden los usos en la fabricación de los billetes y la construcción.

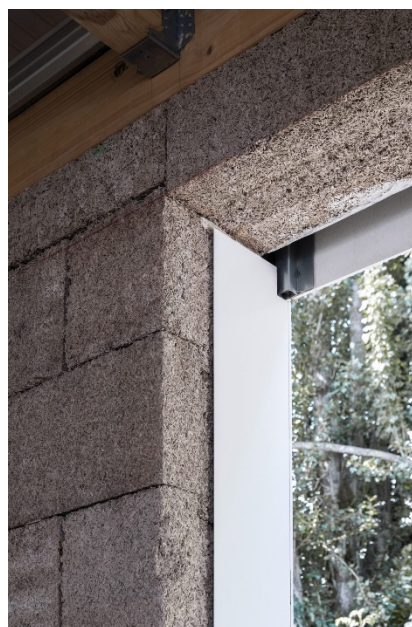


Figura 7. Construcción a Base de Cemento de Cáñamo (Ricketts, 2020).

Figura 8. Pared de Bloques de Cemento de Cáñamo del Pierre Chevet Sports Center (Arch20, s.f.).

Sus fibras eran de gran valor hasta la década de los años 30, cuando por dos hechos coincidentes comienza a desaparecer de los mercados internacionales. El desarrollo de la industria petroquímica, con el lanzamiento de la primera fibra comercial plástica por parte de *Dupont Pharmaceuticals* (Crowley, 2001), y la prohibición del *Cannabis Sativa* (O'Down & Quinn, 2005).

El cáñamo industrial (*Cannabis Sativa*) es una planta de rápido crecimiento, de 80 a 100 días, crece con poca necesidad de fertilizantes y es de climas templados. El tallo de la planta consta de una capa externa, fibras internas y un núcleo leñoso fuerte. Las fibras internas constituyen el 35% del tallo interno y el núcleo leñoso constituye el 65%.

Tradicionalmente las únicas fibras consideradas útiles eran las exteriores, pero hoy en día tienen diferentes usos. Estas fibras tienen la característica de ser más alargadas (5 a 50 mm) y maleables, con una longitud promedio de fibra de 16 m. El núcleo leñoso interior de la planta consta de fibras con una longitud de 0,5 a 0,6 mm. Antiguamente la parte leñosa se consideraba material de desecho, pero hoy en día tiene diferentes usos secundarios (O'Down & Quinn, 2005).

Paja:

Paja es el término general para referirse a la parte de la planta por encima de la raíz y por debajo del fruto o grano de un cereal o cultivo. Siempre que se usa este término nos referimos por tanto al tallo y a las hojas. El tallo a su vez se divide de forma longitudinal por uniones donde se adhieren las hojas, estas uniones se denominan nodos. Entre estos nodos es donde se localizan las fibras largas y homogéneas de la planta y que le dan valor (Carbone, 2003).

Para construir con paja la variedad más utilizada es la paja de trigo, ya que es el cereal más cultivado en el mundo. El trigo es una planta de la familia de las gramíneas y de tal familia encontramos varias especies de plantas que también se usan para la construcción, el arroz, el trigo espelta, la cebada, la avena, el centeno, el triticale e incluso el bambú.

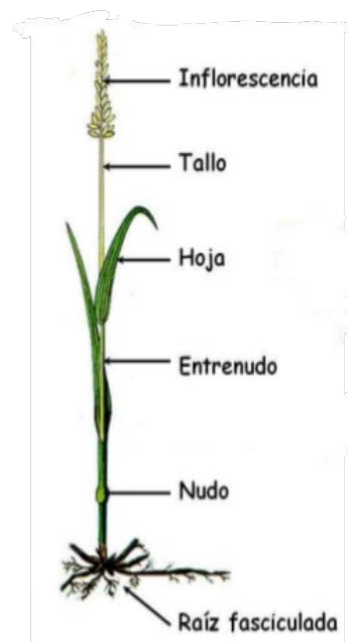


Figura 9. Morfología Gramínea (Salgado Velazquez, 2015, pág. 6).



Figura 10. Fachada Principal Casa Paja Living on the Edge, Zoetermeer, Holanda (Reas, 2010).



Figura 11. Fotografía Completa Casa Paja Living on the Edge, Zoetermeer, Holanda (Reas, 2010).

Su estructura tubular le confiere flexibilidad y propiedades aislantes. Su composición alta en silicatos previene la descomposición y gracias a que posee una capa exterior de cera permite que sea un material con una leve propiedad hidrófuga (Nitzkin & Termens, 2010).

En general a la hora de elegir el tipo de paja para la construcción es más importante la calidad de esta que el tipo utilizado. La más usada es la de trigo dada su mayor producción, pero también está extendida en ciertas zonas el uso de la paja de arroz, que tiene la ventaja de ser más resistente a la humedad (Nitzkin & Termens, 2010).



Figura 12. Fabricación Tradicional de Paja (West Pannon Regional and Economic Development Public Nonprofit Ltd).



Figura 13. Tejado de Paja en Reparación, Buckinghamshire, Inglaterra (Arfin, 2019).

2.1.2 HISTORIA RECIENTE DE LA PAJA

Para entender la historia reciente de la paja debemos conocer cuál fue el hecho singular que más ha cambiado la forma de concebir las construcciones a base de paja, en esto la empacadora ha jugado un papel fundamental marcando un antes y un después permitiendo el desarrollo y estandarización en bloques densos y uniformes de paja.

De manera tradicional la hierba se segaba y apilaba en el lugar en el que se fuera a utilizar. Cuando era necesario su transporte se cargaba en carros y se volvía a descargar de forma manual mediante horcas, un proceso tedioso e ineficiente. Surge la idea para su transporte de compactarla y atarla, lo que lleva a la invención de la empacadora.



Figura 14. Carro de Caballos Transportando Paja (Framing and Country Live 1916, 2016).

Figura 15. Convoy de 47 Camiones Transportando Fardos de Paja (Morphet & Brammer, 2019).

Uno de los primeros incentivos para la movilidad de la paja y los primeros que tuvieron en posesión maquinaria de este estilo fueron los comerciantes de paja, quienes compraban la paja a los granjeros, la empacaban y la transportaban para venderla (Gaines, 2021).

Los primeros registros de empacadoras que se tienen son de mediados del 1800, con la invención de la primera empacadora mecánica. Estas en un primer momento eran estacionarias, lo que implica que eran construidas en los graneros, siendo su principal fin la compactación para el almacenamiento. Hacían uso de caballos para levantar pesos que compactasen la paja al dejarlos caer (Gaines, 2021).

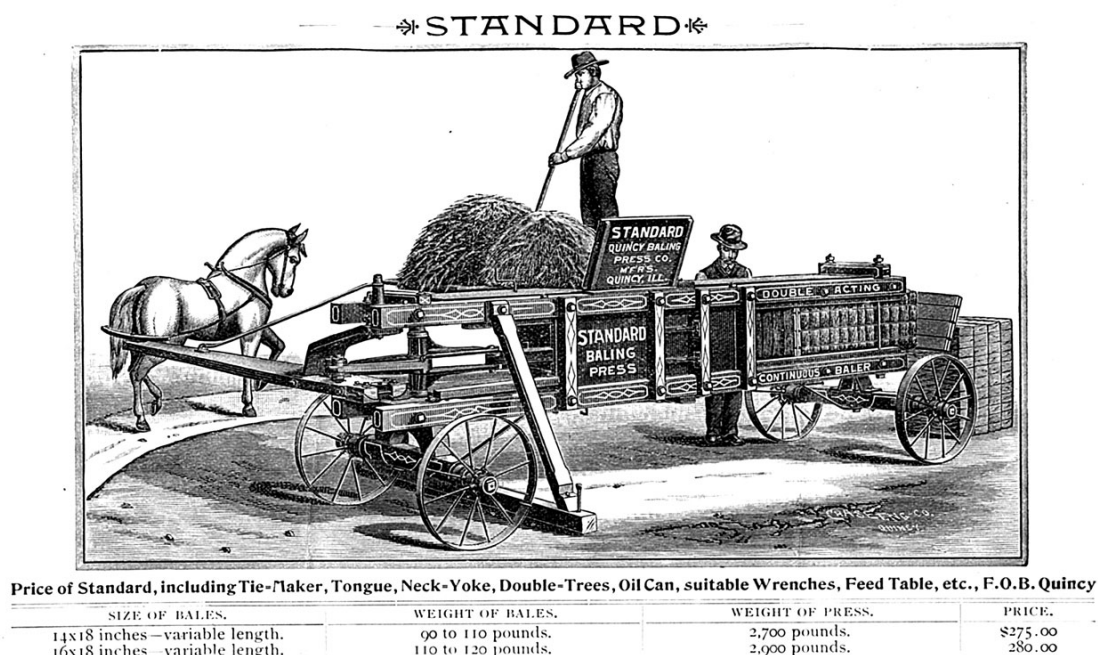


Figura 16. Empacadora Fija de Tracción Animal (Blank, Schwarzburg, & Altherdt, 2021).

En la década de 1850 fueron patentadas diversas empacadoras manuales, pasando en 1872 a las de tracción animal. No fue hasta 1884 que se comenzaron a comercializar de tracción vapor (Myrman & MacDonald, 1997). Se produce otro gran salto en 1936, cuando apareciendo la primera empacadora con atado automático.



Figura 17 . Empacadora Massey Ferguson 2370 (Turale, 2020).

Origen de las Casas con Fardos de Paja:

En un origen las construcciones en paja eran hechas a base de manojos atados de forma manual o mezclándose con algún material como la arcilla. Una vez extendido el uso de las empacadoras, para poder transportar la paja con facilidad, se comienzan a usar para la construcción.

Es así como surge un nuevo material, muy barato, similar a un ladrillo de gran tamaño y con una buena manejabilidad. A medida que se extiende la empacadora por el mundo, y debido a esa nueva disponibilidad de un material “industrializado”, se van generando también allí a donde llega sistemas constructivos que hacen uso de este material.

La construcción con fardos de paja comienza en Estados Unidos debido a un cumulo de condicionantes. A medida que los colonos europeos traspasaban la barrera del río Missouri se encontraban una tierra carente de materiales de construcción, como árboles y piedra, que abundaba en sus países de origen, incluso la disponibilidad de barro para adobe era complicada ya que no disponían de combustible para cocerlos (Kahn, 1979).

Es precisamente, siguiendo la expansión al Oeste, debido a que la normativa exigía la construcción de una vivienda permanente para la adquisición de los terrenos, que se desarrolló la técnica de los terrones de turba (Kahn, 1979).



Figura 18. Inmigrantes Noruegos en Norte América (Daehlen, 2021).

Figura 19. Casa a base de Turba, Primera Casa en Milton, Dakota del Norte, 1880 (Daehlen, 2021).

Esta técnica es usada por primera vez en 1846, con la llegada de los mormones a Nebraska. La construcción de terrones de turba se basa en la extracción de pedazos del suelo de zonas pantanosas en forma de ladrillo con los que se construyen posteriormente los muros (Kahn, 1979).

Un problema adicional se da al Noroeste del estado de Nebraska, una zona conocida como Sandhills, la cual fue abierta a los colonos en 1904 por el Congreso. Esta zona se conforma por un terreno arenoso cubierto de hierba que no resiste el corte en terrones.



Figura 20. Sandhills de Nebraska (The Platte Basin Timelapse , s.f.).

Figura 21. Casa de los Simonton, Purdum, Nebraska, 1908.

Teniendo en cuenta que a la rápida expansión de población por estos territorios áridos es coincidente con una mecanización del campo, pasando de las primeras empacadoras manuales en 1850 a las de tracción animal en 1872 granjeros sin muchos recursos ven en este material abundante una solución a su necesidad habitacional.

Así, las primeras casas permanentes de fardos de paja fueron construidas en las Grandes Llanuras de los Estados Unidos por colonos, registrándose como la primera edificación permanente de paja una casa-escuela construida en 1896 durando apenas unos años al ser comida por las vacas (Myrman & MacDonald, 1997).

Fruto de estas construcciones se conforma el llamado estilo Nebraska, un estilo constructivo caracterizado por ser auto portante. Este sistema fue muy utilizado entre el 1915 y los años 1940. Mientras tanto en Europa las construcciones con paja comienzan en el siglo XX y terminan también sobre la misma época (Nitzkin, 2021).

A Europa se cree que el sistema constructivo llegó desde Canadá, primero a Francia, después se expandió por Inglaterra. La primera casa de la que se tiene constancia es la Maison Feuillette, situada en Montargis, Francia, construida en 1920. Esta primera construcción se trata de un prototipo pensado para reconstruir las zonas rurales tras la Primera Guerra Mundial. Con un sistema de postes y vigas en madera, relleno de paja, se trata de una construcción de bajo coste que sigue siendo funcional a día de hoy (Nitzkin & Termens, 2010).

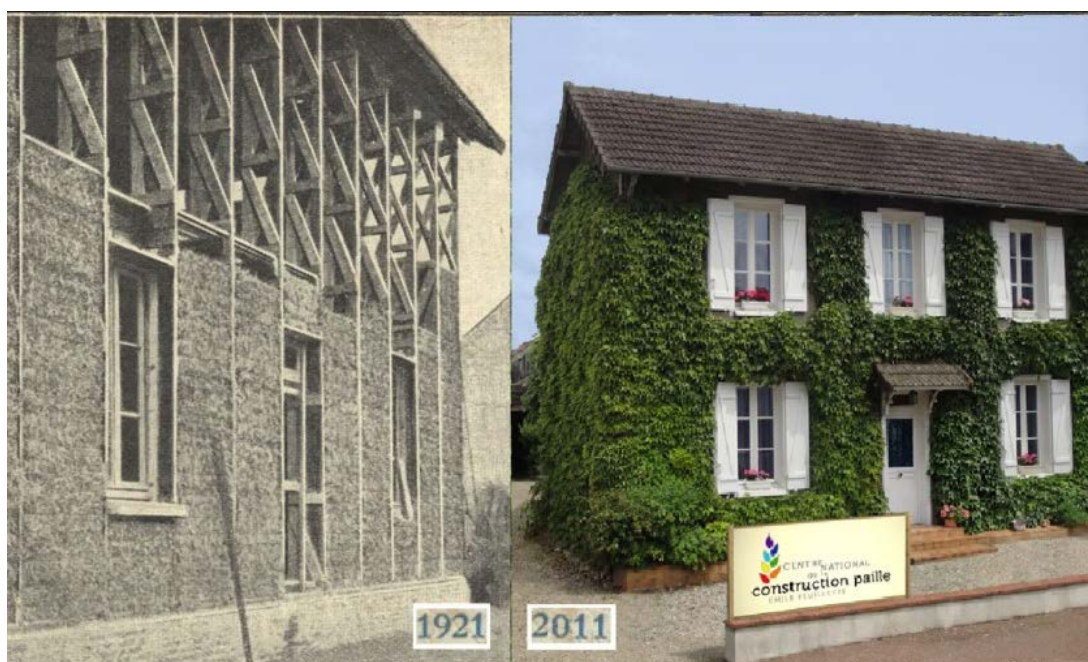


Figura 22. Primera Casa de Paja en Europa, Maison Feuillette, Montargis, Francia (Stroh Paille Paglia, s.f.).

Desuso en los Años 40:

Tanto en Europa como en Estados Unidos se da un desuso de este material a partir de los años 1940 debido a diferentes factores.

En USA las casas en madera eran vistas como casas más lujosas, limpias y menos rústicas. En esta percepción influía la asociación de la paja al campo y un precio superior de la madera.

En la década de 1830 se comienzan a popularizar las construcciones con entramado de madera. Sustituyendo las tradicionales piezas de madera de grandes dimensiones por tablones de 5X10 unidos entre sí, resultando en un esqueleto excepcionalmente resistente y delgado. Este avance es posibilitado únicamente por un factor, la gran cantidad de clavos a bajo coste producidos en masa en las fábricas, algo impensable hasta la fecha.

Esta innovación permite abaratar los costes en material, en mano de obra, y además acelerar el tiempo necesario para una construcción. Hace uso de una menor cantidad de madera, de menor dimensión y no es necesaria una mano de obra especialmente cualificada. Todos estos factores son los que llevan a su popularización y su dominancia en el mercado norteamericano (Kahn, 1979).

Por otra parte, en Europa en esta época comienza la 2ª Guerra Mundial y existe presión de un sector de la construcción ya industrializado, llevando al desuso de la paja (Nitzkin & Termens, 2010).



Figura 23. Timber Framing (Entramado de Madera) (Rockwool Group, s.f.).

Resurgimiento de la Construcción con Paja:

En 1973 Roger Welsch escribe el artículo *Straw Bales* para el libro *Shelter* (Cobijo) de Lloyd Kahn, iniciando un redescubrimiento del sistema. Gracias a este artículo comienza en USA una reexperimentación, creándose la asociación educativa y de investigación *Out of Bale* y la revista *The Last Straw* (Nitzkin & Termens, 2010).

De este movimiento surge el primer libro sobre construcción con paja *Build it with Bales*, escrito por Steve MacDonald en 1991. Es en este momento cuando comienzan a surgir asociaciones, libros y revistas por todo el mundo sobre la construcción con fardos de paja (Ecovive, 2021).

Estas corrientes en USA eran aplicadas en exclusiva en zonas rurales, donde podían llevarse a cabo sin restricciones legislativas. Esta evidencia dejaba claro que para poderse realizar en zonas urbanas era necesario llevar a cabo estudios científicos en cuanto a comportamientos estructurales, sísmicos, resistencia al viento...

Un grupo de persona desarrolla el concepto *Straw-bale Commons*, en Tucson, Arizona, dispuestos a invertir su tiempo y dinero en beneficio de toda la comunidad. Basándose en todas las investigaciones llevadas a cabo en Tucson, Matts y David Eisenberg comienzan el proceso de aprobación legislativa de normativas para construcciones en fardos de paja en el Condado de Pima. Finalmente 2 años después, en 1996, se aprueba el documento y comienza a desarrollarse con él la legislación en California, Nevada y Tejas (Myrman & MacDonald, 1997).

En 1993 se celebró el primer encuentro a nivel mundial de constructores con paja, para 1998 se fundaba y se reunía la Red Europea de Construcción con Balas de Paja en Bretaña (Francia). En la actualidad muchos países europeos aceptan este tipo de construcciones. Actualmente la construcción con paja está presente en todos los continentes y se calcula que se construyen unas 1000 estructuras nuevas al año con este material (Nitzkin & Termens, 2010).

En el ámbito hispanohablante destaca la Red de Construcción con Paja, fundada en 2005 en Barcelona, y la revista Brizna, que se dedica en exclusiva a este tema, fundada en 2007.

2.1.3 SISTEMAS CONSTRUCTIVOS CON FARDOS DE PAJA

Actualmente existen numerosos sistemas para resolver las diferentes necesidades constructivas y que hacen uso de las cualidades de la paja de maneras distintas. Este material es usado con una función estructural, aislante, aglomerante, ... aunque a menudo combinado con otros como la madera, los cuales se combinan en diferentes grados para conseguir una mayor rigidez. Para rematar los muros se suele aplicar mortero en las caras para evitar la degradación de los materiales y darles rigidez.

Entre las diferentes maneras de utilizar la paja para la construcción el uso de fardos de paja es una forma de asegurar la calidad del material, la estabilidad y de economizar en mano de obra. Lo que permite partir de una materia prima barata y abundante que las empacadoras modernas producen con las características necesarias para su utilización.

Para entender este tipo de construcciones, que en su gran mayoría hacen uso de los fardos de paja pretensados, primero tenemos que comprender cuales son las características de los fardos.

Empacadora Moderna y Características de los Fardos:

Las cosechadoras cortan los cultivos de cereal o de plantas fibrosas, recogiendo las espigas. Todo el sobrante, el tallo, es lo que se utiliza para crear los fardos de paja. Este se deja en el campo para que se seque al sol y al aire. Una vez que los tallos están secos, la embaladora se encarga de recogerlos, prensarlos y darles la forma.



Figura 24. Cosechadora, Colorado (Colorado Wheat, 2013).

Las embaladoras disponen de un cilindro recogedor con un rastrillo flexible para llevarla hasta la alimentación y al canal de compresión. Dependiendo de las medidas de este canal será el tamaño final de los fardos, el ancho y la altura de los de los fardos son definidos por las medidas de este canal. Para modificar las medidas de este canal se pueden colocar elementos que modifiquen sus dimensiones. El largo de los fardos se puede escoger en incrementos de 10cm (Minke & Mahlke, 2006).

Estos fardos una vez compresos por la maquinaria son atados mediante cintas de polipropileno o alambres metálicos. También existe la posibilidad de la utilización de cuerdas de sisal, las cuales son orgánicas, pero debido a que se destensan y son más caras no se utilizan en construcción (Nitzkin & Termens, 2010).



Figura 25. Embaladora MAXIMUM LD 80 de 1963 (CLAAS Group, s.f.).

Existen tres tamaños de fardos rectangulares, para la construcción los más usados son los fardos pequeños, los cuales son los más fáciles de conseguir y los más manejables. Los modelos “Jumbo”, los más grande de todo se usan algunas veces en proyectos de gran dimensión y su uso es más habitual en otros países como en Dinamarca.

Además, también existe el modelo de fardos cilíndricos, con un diámetro de entre 0,6-1,8m y longitudes de 1-1,5m. Sus pesos oscilan entre los 150 y 200kg.

Tabla 2 – Medidas de los Fardos de Paja Rectangular (Minke & Mahlke, 2006, pág. 17).

	Ancho	Alto	Largo	Densidad	Peso
Pequeños	45-50cm	32-36cm	80-120cm	80-120 Kg/m ³	15-30 Kg
Medianos	80cm	50cm	70-240cm	-	-
Grandes	120cm	70cm	200-300cm	180-200 Kg/m ³	200-700Kg

Otros aspectos que hay que tener en cuenta son la humedad, la densidad y la calidad de la paja. Para la humedad cuanto más seca esté la paja antes de empacarla más resistirá una vez se utilice en una construcción, el contenido de humedad debe ser inferior al 15% para poder utilizarse, evitando el crecimiento de cualquier hongo. En cuanto a la densidad para el uso en construcciones la mínima a la que deben estar prensados es de 90 Kg/m³ (Minke & Mahlke, 2006).

Para la calidad del material se busca que los tallos sean lo más largos posible, lo cual hace que el fardo sea mucho más resistente, sólido y menos inflamable. Se debe también evitar al máximo el contenido de espigas del cereal, que puede acabar atrayendo a roedores, y evitar las hiervas que crecen en el campo. Esto último se evita levantando la altura de corte para asegurarse que la única planta que se corta a la hora de cosechar sean los cereales y no las malas hiervas, que contienen mayor humedad y podrían provocar putrefacción (Nitzkin & Termens, 2010).

2.1.3.1 SISTEMA DE MUROS PORTANTES O SISTEMA NEBRASKA

En este tipo de construcciones los muros de fardos de paja están diseñados para soportar la carga de la cubierta y de los propios forjados, eliminando la necesidad de cualquier tipo de estructura y transmitiendo todo ese peso a la cimentación. Es un método sencillo y con un uso mínimo de madera, de rápida construcción que puede llegar hasta las 2 plantas de altura.

Este método tiene varias ventajas, es relativamente más simple que los demás, permite un grado de flexibilidad muy grande, tiene un muy buen comportamiento térmico y es, siempre que se pretenda para autoconstrucción, muy económico. El hecho de que sea un proceso tan accesible lo hace ideal para que sea un proceso de autoconstrucción al alcance de todo el mundo sin necesidad de mucho conocimiento previo (Jones, 2002).



Figura 26. Muro Portante, Acrobax Librería y Sala de Conciertos, Rome, Italy, 2013 (European Strawbale Gathering, 2013).

Figura 27. Casa B-D, Desentis, Suiza, 2002 (Atelierschmidt, 2002).

Actualmente este sistema ya no es tan usado debido a que la paja siempre tiende a comprimirse por el peso de la cubierta, a pesar de llevar a cabo una pre compresión de estos con cintas suelen acabar cediendo un poco más, por tanto, no es sencillo hacer el cálculo estructural a los estándares poco flexibles de hoy en día.

Los fardos de paja se colocan como ladrillos de gran tamaño, anclados a una base de apoyo (normalmente una base continua de madera) que se asienta en la cimentación. Las siguientes hileras de fardos son colocadas a rompejuntas, con estacas de maderas que los unen verticalmente, y para coronar el muro se utiliza una viga perimetral rígida de madera. Entre las vigas perimetrales de la base y coronación del muro se colocan cintas tensoras para evitar posteriores compresiones (ver figura 29).

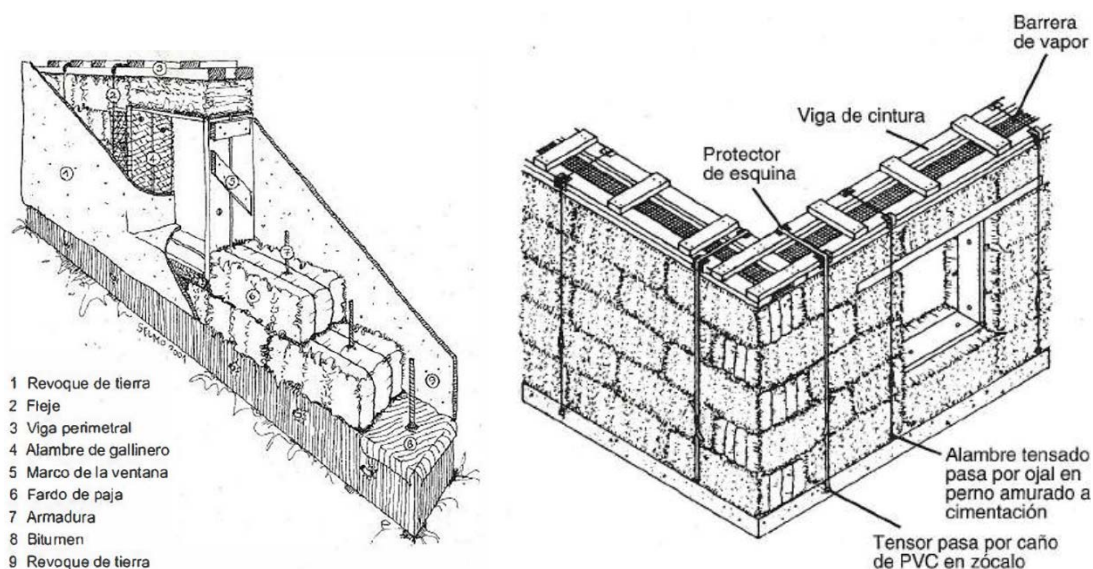


Figura 28. Izquierda, Sistema de Muro de Fardos de Paja Portante (Wimmer, Gruppe Angepaste Technologie, & TU Wien)

Figura 29. Derecha, Sistema de Muro Pretensado Portante (Minke & Mahlke, 2006).

Para casas que dispongan de una segunda planta el forjado intermedio se anclan a la viga perimetral extra entre ambas plantas antes de continuar con los muros hasta el tejado. La viga perimetral se ancla a los fardos y dependiendo de la climatología y del peso del tejado se ata a compresión a la cimentación. El tejado se construye de forma normal apoyándose en la viga perimetral superior.

Para las ventanas y las puertas la manera más sencilla es la instalación de cajas estructurales de madera, que se colocan entre los fardos de paja a medida que se van construyendo los muros. Como forma alternativa se pueden usar listones de madera 100mmx50mm a cada lado de la apertura ancladas de forma segura a la viga perimetral inferior y superior (Jones, 2002).

En cuanto a la posición de los fardos estos deben colocarse siempre de manera horizontal. El revoco interior y exterior de las paredes le da al muro mayor estabilidad. Se puede optar por la pre compresión de los muros previa a la instalación de la cubierta para evitar posteriormente la formación de barrigas (Nitzkin & Termens, 2010).

2.1.3.2 SISTEMA DE POSTES Y VIGAS O SISTEMA DE RELLENO

En el método de postes y vigas el peso del tejado y los forjados se soporta mediante una estructura de madera, hierro u hormigón. Los fardos de paja se utilizan como relleno a modo de aislante y cerramiento, perdiendo su función estructural (Jones, 2002).

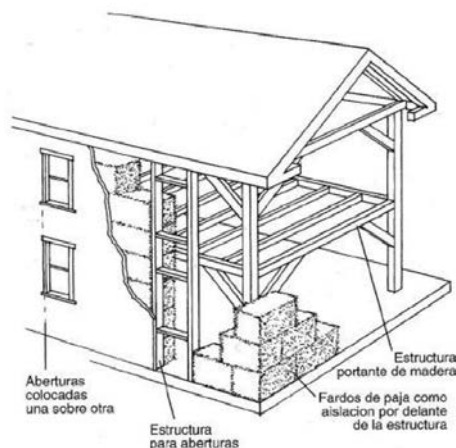
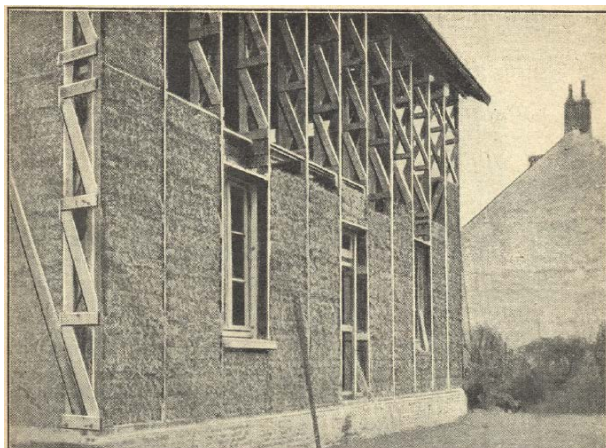


Figura 30. Izquierda, Construcción Muros de la Maison Feuillet (Lamache, 1921).

Figura 31. Derecha, Estructura de Esqueleto con Muro de Fardos de Paja por Delante (Minke & Mahlke, 2006).

Este sistema suele ser más usado en proyectos de grandes dimensiones o en aquellos en los que existan grandes aberturas y espacios amplios. Como añadido este sistema al poder ser calculado como una estructura da más seguridad técnica al no influir factores como la compresión de la paja como en el sistema Nebraska (Jones, 2002).

Por estas características este método es menos experimental, pero tiene un mayor gasto de madera u otros materiales en su construcción y requiere un alto grado de especialización.

Es importante que los fardos de paja estén conectados a los elementos estructurales, ya que es necesario que soporten las cargas horizontales del viento y no están sometidos a cargas verticales de compresión que puedan formar barrigas en el muro (Nitzkin & Termens, 2010).

En este tipo de construcciones la estructura de postes puede estar desconectada del muro, embutida por completo o enrasada o estar formada por cajones del mismo ancho del muro. Desde el punto de vista del diseño y para ayudar a asegurar los fardos a la estructura se suele optar por los postes

centrados en los fardos, sirviendo la estructura como anclaje a estos, permitiendo una prefabricación de la estructura y un ahorro en costos (Jones, 2002).

La alternativa estructural a los postes y vigas es la utilización de columnas de madera, colocando fardos uno encima de otro encajados en un marco estructural de madera. El ancho de las columnas es de un único fardo. Este sistema constructivo reduce al máximo la dificultad debido a que se minimiza la necesidad de fardos a medida que se utilizan.



Figura 32. Casa de Postes y Vigas (Simmons, 2018).

2.1.3.3 SISTEMA HÍBRIDO Y OTROS

Existen muchas combinaciones posibles de sistemas constructivos que podemos usar según las necesidades que tengamos, lo más común es una combinación entre sistemas portantes y sistema de postes y vigas, ya que son los más utilizados.

En la siguiente imagen (figura 33) del libro *Build it with Bales* (Myrman & MacDonald, 1997) podemos ver el ejemplo de un sistema híbrido, donde los muros exteriores son portantes. Debido a la necesidad de un espacio interior más grande se ha optado por añadir pilares y vigas centrales de madera para ayudar a soportar la cubierta.

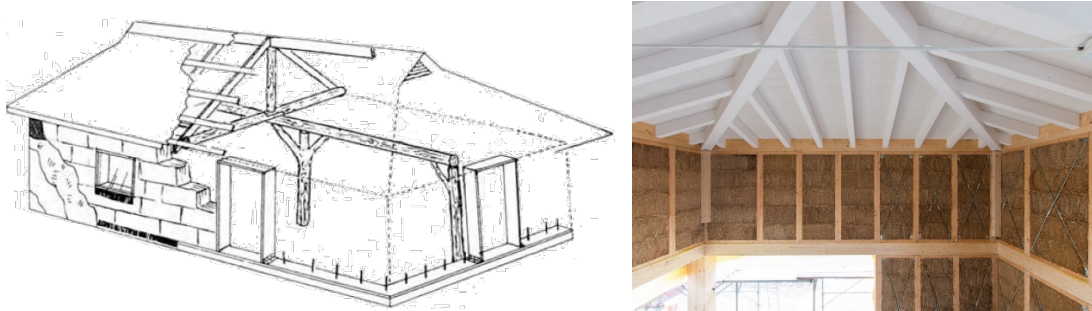


Figura 33. Sistema Híbrido Estructural (Myrman & MacDonald, 1997).

Figura 34. Ampliación de una Vivienda con Paneles Prefabricados y Vigas de Madera (Edifici di Paglia Italia, 2021).

Además de estos sistemas mayoritarios encontramos muchos otros menos populares, cada uno con sus particulares que buscan adaptar la técnica a todo tipo necesidades o condiciones muy específicas. La ventaja que nos aporta es tomar las ventajas de los diferentes sistemas que elijamos utilizar, pero como contrapartida trae que complica el diseño de la edificación.

Sistema Greb:

Desarrollado por *Groupe de Recherche Écologique de La Baie* (G.R.E.B.) en los años 90, de la cual toma su nombre, consiste en la utilización de madera, la paja y la cal (Le Groupe de Recherches Écologiques de La Baie, 2021).

Con listones de madera se crea una doble estructura estandarizada en la cual se encierran los fardos de paja, estos son recubiertos por un mortero a base de cal y serrín mediante un encofrado. Los montantes de madera crean un hueco interior suficientemente ancho para la colocación de los fardos de paja y posteriormente es el hueco existente entre la cara exterior de los montantes y la paja, de unos 4cm, el que se rellena de mortero vibrado para darle un acabado perfectamente regular.

Los encofrados se atornillan en la propia estructura de madera para ser retirados posteriormente, pudiendo ser ese el acabado final o pudiendo aplicarse un enlucido o cualquier otro tipo de acabado.

Esta forma de construcción, con una estructura estándar de madera y un vertido de mortero, facilitado por el encofrado, hace que sea un sistema bastante sencillo de llevar a cabo. Como desventajas tenemos un mayor uso de madera que otras técnicas, generalmente se utiliza cemento para el mortero y hace falta una cantidad elevada de elementos metálicos, como tornillos y mallas metálicas, para la fijación de este a la estructura de madera.



Figura 35. Sistema Greb en Construcción (López, 2021).



Figura 36. Sistema Greb en Construcción (Déry, SC., & Sc., 2004, pág. 18).

SATE Paja:

El sistema SATE se basa en el aislamiento térmico por el exterior del edificio. Al utilizar la paja conseguimos todas las ventajas típicas de este sistema como es la protección contra inclemencias climatológicas y estabilidad de la temperatura de la hoja interna del muro reduciendo en gastos de climatización y las condensaciones.

Existen dos formas de llevar a cabo este tipo de aislamiento, mediante anclajes a la pared y pretensándolos hacia la parte inferior o mediante una estructura ligera de madera que permita la compresión de los fardos en su interior (Nitzkin & Termens, 2010).

En obra nueva da mucha libertad de diseño, pudiéndose adaptar como cualquier otro aislante, y evita la formación de puentes térmicos. En edificaciones existentes la paja puede utilizarse como una solución de bajo coste para mejorar las condiciones de aislamiento.

Para este sistema debemos tener muy en cuenta ciertas características del material para su uso, adaptándolo para poder hacer un buen uso de él. De forma general deberemos ampliar el tamaño de los aleros de la casa para evitar al máximo la humedad, aplicar revocos transpirables y debemos siempre utilizar un zócalo impermeable que nos permita elevarlo al menos 50cm del suelo.



Figura 37. SATE Fardos de Paja (Taller Karuna Casa de Paja, 2021).



Figura 38. SATE Fardos de Paja (STEP Strawbale Training for European Professionals, 2021).

Sistema CUT (Cell Under Tension):

Desarrollado por Tom Rijven, el sistema “Célula Bajo Tensión”, es una evolución del sistema Nebraska aunando al entramado de madera tradicional. Su denominación proviene de la compresión que se realiza de forma lateral, inferior y superior a los fardos de paja con el mínimo material estructural posible.

Los fardos de paja son revocados y se dejan secar para luego ser embutidos entre montantes verticales de 10cm de ancho por 3cm de grosor, haciendo que estos listones queden encajados y completamente tapados por la paja. Esta compresión ejercida en la paja y de esta hacia la estructura hace que la madera utilizada tenga la suficiente capacidad portante.

A estos fardos de les retiran las cuerdas una vez colocados en su posición y se comprimen mediante listones horizontales, manteniendo así la compresión superior e inferior. Estos listones horizontales son incluso más dinos, con unas dimensiones de 4cm por 2,5cm. Por último, se adiciona una capa de 2.5cm de revoco por encima del ya existente con el fin de darle mayor resistencia a las cargas horizontales debidas al viento. Para este sistema se suele optar por fardos con una longitud de 65cm y los huecos entre listones de madera de 60cm (Nitzkin & Termens, 2010).



Figura 39. Sistema CUT (Arquitectura y Salud, s.f.).

Figura 40. Muro Sistema CUT (Nitzkin, 2019).

Paja a la Cal:

Esta técnica fue desarrollada por Ismael Caballero, como forma de eliminar cualquier tipo de problemas con roedores y fuego en las construcciones con fardos de paja. A diferencia de la aplicación superficial de revoco de cal, este sistema sumerge completamente el fardo en cal hidráulica, convirtiéndolo en un bloque macizo cuando se seca. Esto le confiere impermeabilidad, resistencia a insectos y roedores y le da una mayor dureza (Nitzkin & Termens, 2010).



Figura 41. Construcción Paja a la Cal (Nitzkin & Termens, 2010, pág. 95).

2.1.4 TÉCNICAS CONTEMPORÁNEAS CON PAJA

En este capítulo se ha optado por incluir aquellos sistemas constructivos que hagan un uso necesariamente industrial y que, por tanto, sean realizados normalmente en una fábrica por un productor del material.

2.1.4.1 PREFABRICADOS DE PAJA

Para la construcción a base de prefabricados existen dos opciones, la que es puramente industrial y se encarga a una empresa externa, o la opción de la fabricación de los módulos específicamente para la obra. Esto da una mayor flexibilidad al sistema pudiendo responder a un mayor número de necesidades.

Una de las mayores ventajas de este sistema es la creación de módulos estandarizados con un control en cuanto a calidades y cualidades superior a los demás. La otra gran ventaja es la no dependencia de las condiciones atmosféricas, pudiendo llevar a cabo los trabajos cubiertos, lo que permite poder trabajar en épocas de frío y lluvias.

Los elementos prefabricados de madera y paja pueden funcionar tanto como elementos estructurales o como elementos de cerramiento. Tanto la paja como la madera funcionan de forma conjunta para darle solidez a los módulos.

Normalmente se utilizan dos opciones para los paneles, en cajones cerrados donde la paja está completamente tapada con tableros de madera (figura 43) o paneles con la paja preparada para ser revocada in situ (figura 42).



Figura 42. Obra con Paneles Prefabricados (Okambuva.coop, 2021).



Figura 43. Panel Prefabricado Recubierto con Madera (Honrado, 2021).

En cuanto al método de fabricación podemos encontrarnos varias alternativas en el mercado. Hay empresas que fabrican los módulos a base de fardos de paja pretensados, otras que optan por paja suelta la cual es prensada en el molde facilitando la creación de elementos de cualquier tamaño. Existen también opciones de módulos con el revoco pre aplicado o cualquier acabado final que se requiera.

En este tipo de obras hay que tener en cuenta los desperfectos que puedan surgir del transporte, pero nos aporta los beneficios del montaje rápido y el control de fábrica del material.

Encontramos una de las mayores diferencias en los tipos de fabricación en el tamaño de los módulos. Modelos de gran formato como los que produce la empresa ModCell pueden llegar a medir 3X3m (ModCell, 2021) en contraposición a los módulos de formato pequeño 0,49X 0,9m Bala-Box (Bala-Box, 2021).



Figura 44. Fabricación Panel ModCell (ModCell, 2021).

Figura 45. Proyecto Realizado con Paneles ModCell (ModCell, 2021).

Figura 46. Proyecto en Construcción Usando Bala-Box (Bala-Box, 2021).

La diferencia entre módulos grandes y los pequeños es que los primeros nos permiten formar los muros con rapidez y con menor necesidad de anclajes, como contrapartida tenemos el uso necesario de maquinaria pesada para su colocación. Los módulos de tamaño pequeño tienen la ventaja de no necesitar maquinaria para la colocación pero tienden a sufrir en mayor medida los puentes térmicos, ser más propensos a problemas estructurales y a necesitar un mayor uso de madera (Lopez Altuna & Iborra Lucas, 2015).

En cuanto acabados finales al ser edificaciones a base de materiales naturales, para continuar con esta característica en todo el edificio, suelen recubrirse con revocos naturales como la cal o la arcilla, pero admiten cualquier tipo de acabado. La paja puede venir ya revocada o realizarse in situ por medio de adherencia mecánica o bien rematarse con cualquier acabado mediante anclajes.

2.1.4.2 CEMENTO DE CÁÑAMO

El cemento de cáñamo es un método que pretende crear un hormigón natural, creando paredes sólidas ya sea moldeado con un encofrado o dentro de una estructura de madera. Para fabricarlo se utilizan fibras de cáñamo mezcladas con agua y un aglutinante de cal, una vez se mezclan comienza la reacción química entre la cal y el agua dando como resultado el aglutinamiento de todas las partículas (Magwood, Essentia Hemcrete Construction, 2016).



Figura 47. Moldeado In Situ de Muro con Cemento de Cáñamo (Stanwix & Sparrow, 2014).

Figura 48. Aplicación de Cemento de Cáñamo Mediante Spray (Stanwix & Sparrow, 2014).

El material permite diferentes tipos de aplicaciones, moldeado in situ mediante encofrado, ser proyectado a presión en un marco estructural o en formatos prefabricados (Stanwix & Sparrow, 2014).

Al contrario que en otras mezclas de materiales de obra (como en el hormigón común), el aglutinante no pretende rellenar todos los huecos entre partículas, únicamente cubrir las partículas del cáñamo para que se adhieran entre ellas. Esto implica que se forme una mezcla con un gran número de huecos en el interior (Magwood, Essentia Hemcrete Construction, 2016).

Este material adquiere bastante rigidez una vez proyectado o vertido en el encofrado y se puede desmoldar al cabo de 12 horas, normalmente se utiliza como relleno en estructuras de madera siendo esta la que aporta rigidez estructural al edificio.

La gran ventaja de este material es su capacidad aislante. Pequeñas burbujas de aire se quedan atrapadas en el interior del material proporcionando un buen aislamiento térmico, obteniendo una conductividad térmica de 0.12 w/mK (O'Down & Quinn, 2005).

Además de las capacidades aislantes, es un material poroso que permite cierto grado de transpiración del material, puede tener una función estructural y gracias a su flexibilidad permite pequeños movimientos sin fisurarse (O'Down & Quinn, 2005).

2.1.4.3 PAJA PRENSADA

Alrededor de 1920 se comenzaron a comercializar en Francia y Suiza placas de paja unidad por alambres, posteriormente en los años 60 en Inglaterra se desarrollaron las que se comercializan hoy en día que prescinden de aglutinantes valiéndose únicamente de presión y temperatura. Existen también en el mercado placas encoladas con resinas a alta presión que alcanzan una rigidez similar a las placas OBS (Minke & Mahlke, 2006).

Los tableros prensados son a base de paja, se fabrican sin la utilización de resinas ni aglutinantes, son producidos a elevada presión y temperatura consiguiendo la suficiente resistencia como para mantenerse unidos, y normalmente están rematados por sus caras con cartón (Ekopanely Servis s.r.o., 2021).

Generalmente su usan para particiones internas o para cerramientos exteriores sin tener función estructural, aunque pueden ir asociados a la estructura de carga, ya sea incluidos en esta o cubriéndola. Estos paneles permiten cualquier tipo de acabado (Ekopanely Servis s.r.o., 2021).



Figura 49. Panel Paja Ekopanely (Ekopanely, s.f.).



Figura 50. Tablero de Paja (Teoría de Construcción, 2017).

2.1.5 POTENCIALIDAD DE LA PAJA

En este capítulo se analizan y estudian diversos aspectos de la paja, que explican y analizan el por qué es conveniente el uso de este material en la construcción. Tanto a nivel ambiental como desde un punto de vista más pragmático existen diversas ventajas en la utilización de la paja sobre los materiales más comunes en la arquitectura.

2.1.5.1 SOSTENIBILIDAD Y BENEFICIOS MEDIOAMBIENTALES:

Ciclo de Vida:

El significado de sostenible la RAE “que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar grave daño al medio ambiente” (Real Academia Española, 2021). Por la anualidad de la producción de la paja queda bastante claro al respecto que se puede considerar como material sostenible, por tanto, siempre que se use para sustituir a otros materiales limitados estaremos contribuyendo a la sostenibilidad del proyecto.

Para poder incidir en todos los aspectos sostenibles de un proyecto debemos fijarnos también en el ciclo de vida de un edificio. Para esto hay una herramienta que se puede extrapolar a diferentes industrias y que es especialmente interesante en arquitectura, ya que la construcción es una parte muy importante del consumo de recursos de nuestra sociedad.

En el estudio de Natalia Riezkin y Agustín Hernández de 2005 definen análisis del ciclo de vida como el estudio que abarca desde la obtención de materias primas hasta el fin de la vida útil de la edificación, pasando por todos los puntos intermedios del proceso como el procesado de materiales, la distribución y el mantenimiento (Rieznik Lamana & Hernández Aja, 2005). Este método se vuelve muy interesante porque al tener en cuenta todas estas variables para cada material nos permite comparar el impacto ambiental de cada uno de ellos y poder tomar la mejor elección.

Según el estudio mencionado anteriormente existen 6 etapas a considerar en el Ciclo de Vida en la arquitectura.

CICLO DE VIDA DE UN EDIFICIO

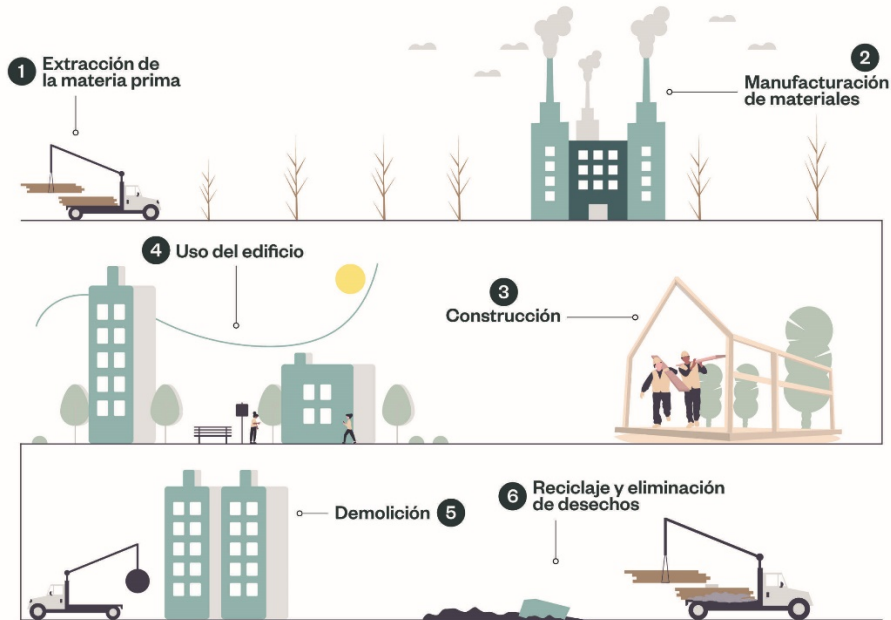


Figura 51. Ciclo de Vida de un Edificio (Econova Institute, 2021).

1 Extracción de los recursos: el cual no afecta de forma directa a este material, más allá del gasto que se haga en fertilizantes, que además ese impacto sería compartido con la industria alimentaria que lo produce como subproducto.

2 Producción de materiales: debido a que la paja en la gran mayor parte de casos es un subproducto sobrante en la producción de cereal, que no suele poder ser aprovechado por el ganado en las cantidades que se produce, el impacto ambiental producido por en esta etapa de la paja es muy bajo, hasta el punto de que si no se destina para este muchas veces se termina quemando para eliminar el sobrante.

3 Distribución: a pesar del bajo coste que tiene hoy día el transporte, una ventaja sobre muchos materiales es la producción casi universal de las diferentes variedades de cereal, lo que fomenta la búsqueda y utilización de material local.

4 Construcción: para esta etapa se considera el lugar de implantación como una industria en sí mismo, ya que en las obras se acoplan los materiales,

debiéndose considerar los impactos medioambientales como el ruido o las partículas. Con las construcciones con fardos de paja las partículas producidas son muy bajas y naturales y con el uso de otras técnicas modernas que no hacen uso de los fardos la creación de partículas es inexistente. El único factor que puede ser perjudicial es el ruido producido a la hora de manipular los materiales estructurales que la complementan como puede ser la madera o elementos metálicos o los elementos de acabado, pero en general esos niveles de contaminación serán bajos.

5 Ocupación y Mantenimiento: en este ámbito se engloban dos categorías, el consumo de energía y las intervenciones que no impliquen la demolición, como son las reparaciones y remodelaciones.

Para la primera de estas, el consumo de energía, la paja es un material aislante que puede ser usado tanto en muros exteriores como interiores, al tener esta característica aislante y ser usado como cerramiento exterior ya sea sola o combinada con una estructura de madera hace que se eliminen la gran mayoría de los puentes térmicos que afectan a las construcciones con materiales más tradicionales. Habría que tener en cuenta principalmente el mantenimiento de la estanqueidad con revocos, que es el único problema que puede presentar el material en este aspecto.

Para el segundo, las reparaciones o mantenimientos necesarios durante la vida del edificio suelen ser muy bajos siempre que se haya previsto bien las soluciones contra la humedad, si esto es así es un material muy resistente que no necesita prácticamente de mantenimiento.

6 Demolición: con el fin de la vida llega la fase de demolición, donde se debe considerar la reutilización o el reciclaje de los materiales utilizados. En este punto sobresale, ya que la paja se puede reutilizar en otras obras indefinidamente hasta que se dañe por algún tipo de factor biótico, que no debería afectar si el material es de calidad y se ha mantenido seco, únicamente habría que re prensarlo si fuera necesario. En el caso de querer utilizar material nuevo el viejo es biodegradable, lo que implica que no produce ningún tipo de residuo perjudicial ni necesita de productos químicos.

Residuos Agrarios Incinerados:

Una de las principales razones que justifican la necesidad de la implementación de la paja como material constructivo es que los cereales con la principal plantación agraria del ser humano, esto implica que cada año se generan miles de millones de toneladas de forma global de residuos agrarios, produciéndose una cantidad ingente de material orgánico al que todavía no se le ha encontrado un uso a una escala suficiente como para que económicamente no se opte por su destrucción mediante incineración (Jones, 2002).

Se calculan que solo en Europa se producen 144 millones de toneladas de residuos de trigo al año, de estos 115 son producidos directamente en el campo y por tanto serían susceptibles de ser usados como material constructivo. La suma de los residuos de cebada, avena, arroz, centeno, triticale y trigo suman 194 millones de toneladas de residuos producidos en el propio campo (Searle & Malins, 2013), o lo que es lo mismo 194.000.000.000 Kg que en su mayoría acaban incinerándose.

Este punto es de los menos tenidos en cuenta a la hora de analizar los argumentos a favor de la utilización de este material, pero debería ser de los más importantes. Solo el aprovechamiento de una pequeña parte de estos residuos para la construcción podría ahorrarnos cantidades ingentes de CO₂ liberado a la atmósfera en el proceso de quema y aún más si tenemos en cuenta la huella de carbono de los materiales que sustituya.



Figura 52. Quema de Residuos Agrarios, Punjab, India (Singh Yadav, 2019).



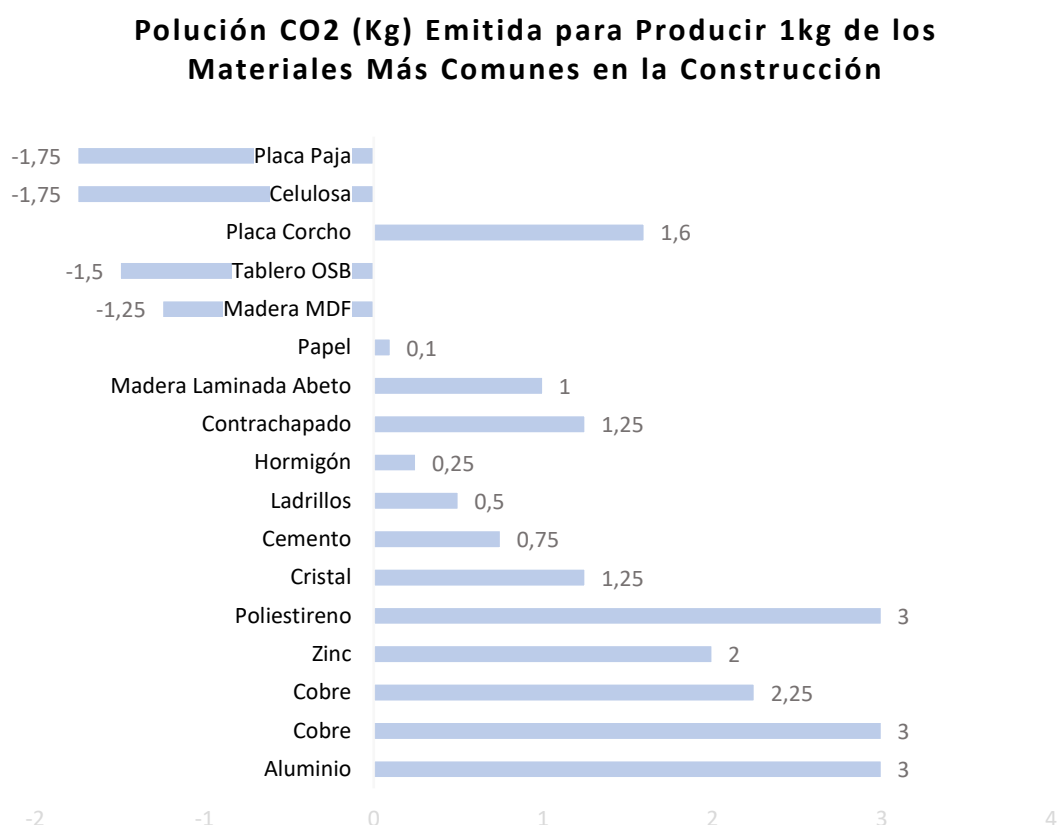
Figura 53. Quema de Residuos Agrarios en Incineradora (UNECE, 2021).

Huella de carbono:

La huella de carbono de un edificio se define como el total de los gases de efectos invernaderos causados de forma directa e indirecta para construirlo. Siguiendo esta definición casi todas las casas tiene una huella de carbono positiva (Jones, 2002).

Para hacer este cálculo debemos contabilizar todos factores de una obra, materiales, maquinaria, energía necesaria, ... En las edificaciones el factor que más contribuye a esta cuenta es la de los materiales, siendo el que más afecta al porcentaje total. Por tanto, si nuestro objetivo es que las edificaciones alcancen una huella cero o incluso que su huella de carbono sea negativa deberemos comenzar fijándonos por los materiales de construcción.

Tabla 3 – Polución Emitida en la Producción de Materiales (Jones, 2002).



Para el análisis de los materiales de construcción tenemos en cuenta la cantidad de CO₂ que se produce o secuestra durante su proceso de fabricación y lo producido durante su transporte. Normalmente los materiales tienen una cuenta positiva, exceptuando ciertos materiales orgánicos como la paja, la madera o el cáñamo.

Podemos ver que hay materiales como los metálicos que contaminan, debido a su proceso de extracción, mucho más que los demás, aunque generalmente su uso se limita a casos puntuales. Por otro lado, vemos materiales como el cemento y la madera contrachapada que no son tan perjudiciales, pero debido a las grandes cantidades que se utiliza de ellos lleva a que contaminen más en números totales que otros más contaminantes.

Por tanto, si queremos reducir o eliminar la huella de carbono, necesitamos usar materiales poco emisores de CO₂ o que sean negativos y que además se usen como materiales mayoritarios, para esto la paja es uno de los materiales que mejor encaja en estos condicionantes para conseguir alcanzar las cero emisiones en una edificación.

2.1.5.2 MOTIVOS DE ELECCIÓN DE LA PAJA

Actualmente existen diversos motivos para la elección de la paja como material constructivo, ya sea por un aumento en cuanto preocupaciones ambientales, un cambio en el modelo económico o simplemente una moda cada día este material se transforma en una opción más viable y deseada. Existen numerosos incentivos para la elección de este material, pero destacan tres grandes categorías por encima de todos.

1 Concienciación Ambiental:

El entendimiento de que el entorno físico es frágil y necesario nos lleva a un sentimiento de responsabilidad y de respeto hacia el mundo natural. Esto nos lleva a que se genere una concienciación sobre los diferentes problemas que nosotros, como sociedad, generamos en el planeta.

Se vuelve muy atractivo por tanto solucionar los problemas medioambientales implementando soluciones en todos los campos donde sea posible si no solventarlos, intentar al menos reducir al mínimo los problemas causa-efecto que dañan nuestro entorno. Con la implementación de la paja en la construcción ayudamos a que varios de estos problemas tengan un impacto menos a largo plazo en nuestras vidas.

Reducir las emisiones de polución al aire, no solo evitamos el gasto de transporte de materiales que no se producen de forma local hasta la obra, ya que la paja se produce en prácticamente cualquier punto donde existan personas, sino que además conseguimos evitar que se convierta en un residuo agrario y termine siendo destinado a la quema.

La elección de este material conlleva, mediante la sustitución, una disminución en el uso de materiales renovables no como pueden ser el hormigón y el polietileno. Esta sustitución de materiales, por la forma de trabajar de la paja y los sistemas constructivos que la utilizan tiene también el añadido de mejorar la eficiencia energética, ya que se eliminan los puentes térmicos presentes en sistemas constructivos tradicionales.

2 Bajo Coste:

El mayor motor del mundo es el económico y como tal tenemos el factor coste que gracias a la naturaleza del material se ve enormemente reducido en cuanto a materia prima a la hora de elegirlo para una construcción.

En cuanto a la construcción con fardos de paja el ahorro está en el precio de la materia prima, la paja, y el ahorro en mano de obra ya que estos proyectos suelen ser de autoconstrucción, pero cuando nos pasamos a métodos más modernos y escalables nos encontramos que las ventajas económicas se mantienen.

Un precio muy barato en la paja, unido a que el uso combinado con la madera en los módulos prefabricados se ve disminuido en comparación a una estructura únicamente realizada en madera reduce los costes. Pero no solo se produce un ahorro en cuanto a materiales, sino que el sistema de módulos prefabricados permite también ahorrar costes en cuanto a mano de obra y a tiempo de construcción, siendo muy sencilla de instalar y reduciendo mucho el tiempo necesario.

El libro *Building with Straw Bales, A Practical Guide for the UK and Ireland* (Jones, 2002) estima, sin mayor detalle que la tipología de vivienda, el coste de una casa de 3 habitaciones alrededor de 100.000 libras, comparándolo con el coste de una vivienda asequible municipal costaría 110.000 libras. Ajustado por el cambio de moneda del año de publicación (año 2002, cambio medio 1.6) y por la inflación serían unos 231.000 euros contra unos 254.652 euros (UKCPI Index Since 1989). Lo que hace una diferencia de precio actual de 23.652 euros, además afirma que el ahorro será mayor cuanto más grande sea el edificio (Jones, 2002).

3 Cualidades Estéticas:

Entre las cualidades estéticas de la paja se incluye su fuerte carácter, similar a otros materiales como el adobe, y su calidez inherente por el tipo de material en combinación con la madera y otros materiales naturales.

Los muros en paja tienen muchas posibilidades, desde muros rectos y racionales a muros curvos y orgánicos. La posibilidad de creación de ventanas profundas o esquinas redondeadas da una gran libertad a la hora del diseño y de las sensaciones que transmite.

There's an emotional depth about thick walls that people respond to. Plus, [the construction] has all the right attributes: it's user friendly, environmentally friendly, and pocketbook friendly.

(Whiteley, 1995, pág. 106).

2.1.6 CUALIDADES FÍSICAS DE LA PAJA

En este capítulo se analizan cada una de las características físicas importantes a la hora de utilizar un material en una edificación. Este análisis se lleva a cabo mediante los datos de diversos manuales de la construcción, en los cuales se incluyen ensayos técnicos del comportamiento de la paja.

Entre estos estudios se incluyen ensayos se incluye el *Energy Assessment of a Straw Bale Building* llevado a cabo por Carol Atkinson y la Universidad de East London (Atkinson, 2008), el cual se centra en estudiar una casa vacacional con muros portantes de fardos de paja y forjados de madera, haciendo un análisis profundo de todas sus cualidades físicas.

Además libros como el de *Building with Straw Bales; A Practical Guide for the UK and Ireland* (Jones, 2002) aporta datos muy valiosos sobre diferentes comparativas de materiales y tipos de edificaciones, centrándose en la comparativa de la paja a efectos de normativas urbanísticas con respecto a otros materiales.

Aislamiento Térmico:

La energía calórica se transfiere mediante conducción, esto implica la transferencia de energía térmica entre moléculas cercanas debido a una diferencia de temperatura. Siempre ocurre desde la región con mayor temperatura (con más energía) a la región con menor temperatura (menor energía), y estará en marcha hasta que se alcance el equilibrio. Para evitar esto usamos lo que se denomina como aislantes térmicos, que son materiales que reducen el ritmo de transferencia de calor (Ashour & Wu).

La conductividad térmica (λ) es la medida que se usa para medir la capacidad de conducción que tiene un material. Los materiales menos conductivos son denominados aislantes, entre los que nos encontramos la espuma de poliuretano con 0.026 W/mK, el aire 0.026 W/mk, un muro de paja ronda los 0.04 W/mK, madera de pino 0.148W/mK. Otros materiales como el yeso (0.488 W/mK) o el ladrillo (0.814 W/mK) se encuentran en un punto intermedio. En el extremo opuesto tenemos los conductores, como el cobre con 389 W/mK.

A la hora de calcular como de aislante es un muro o un material como la paja no podemos tener en cuenta únicamente el dato de la conductividad termina, debido a que esto solo nos da la idea de la capacidad aislante de ese material.

Uno de los factores que influye a la hora de aislar una edificación u objeto es también la resistencia térmica de una superficie, esto debe sumarse a la resistencia térmica del elemento. Esto se debe a que cada vez que los materiales en contacto no están unidos existe una resistencia extra a la transmisión de energía calórica.

Este fenómeno de resistencia superficial es el que explica que materiales con un mayor número de capas aislen más que materiales monolíticos. En el caso de la paja debido a que está formada por tallos alargados que al compactarse atrapan numerosas burbujas de aire hace que sea un buen aislante térmico, similar a lo que ocurre con otros aislantes comunes como la lana de roca o el polietileno expandido.

La transmitancia térmica (U), es la medida de calor que fluye por unidad de tiempo y superficie. En su cálculo tenemos en cuenta la resistencia térmica total del muro, sumando las resistencias superficiales interior, las resistencias de cada una de las capas y la resistencia superficial exterior. Para poder entender hasta qué punto funciona la paja como aislante en una edificación primero debemos fijarnos en la conductividad térmica de la paja medida con el valor de transmitancia térmica de un caso concreto y poniendo en comparación valores de casos reales (cuanto menor sea el número mayor capacidad aislante).

En España el Código Técnico de la Edificación (CTE) especifica unos mínimos recomendados para los edificios de nueva edificación según el elemento constructivo que sea. Divide todo el país por zonas, desde la α a E, siendo la E la más restrictiva.

Tabla 4. Valores Límite de Transmitancia Térmica CTE (Gobierno de España, 2019).

Elemento	Valor U (W/m ² *K) por Zona Climática				
	α	A	C	D	E
Muros	0,8	0,7	0,49	0,41	0,37
Suelos	0,8	0,7	0,49	0,41	0,37
Cubiertas	0,55	0,5	0,40	0,35	0,33

La paja tiene un valor U (transmitancia térmica) entre 0.13 W/m²K y 0.2 W/m²K para un grosor de 450mm, dependiendo de la calidad y del tipo de instalación que se haga, sin incluir en los datos los acabados finales de ambas caras, lo cual disminuiría el dato (Jones, 2002).

Tabla 5 – Valor Aislante Cerramientos Verticales (Jones, 2002).

Materiales	Valor U (W/m²K)
105mm ladrillo, 75mm fibra mineral, 100mm bloques ligeros de cemento, 13mm enfoscado	0.33
100mm bloques hormigón pesado, 75mm fibra mineral, 100mm bloques hormigón ligero, 13mm enfoscado	0.40
100mm bloques hormigón ligero, 75mm fibra mineral, 100mm bloques hormigón ligero, 13mm enfoscado	0.29
13mm enfoscado, 450mm paja, 13mm enfoscado	0.13
50mm arcilla, 400mm paja, 50mm arcilla (Golański, 2015)	0.12-0.14

Como se puede observar en los datos de la tabla superior un muro hecho con paja funciona de una forma bastante buena aislando una edificación, llegando a tener el doble o más del doble de la capacidad aislante de un muro convencional que hace uso de 75mm de aislante de fibra mineral.

Por tanto, un muro realizado en paja necesitará un grosor bastante pequeño para cumplir con los requisitos mínimos de aislamiento según la normativa española. En el caso de optar por los grosores estándar de este tipo de muros que van desde 40 cm a 50 cm se conseguiría una capacidad aislante superior en al menos dos veces al mínimo exigido para las regiones más frías del país.

Masa Térmica:

La masa térmica de los materiales a la hora de construir una vivienda es un factor importante a tener en cuenta, ya que especialmente para espacios que están ocupados de forma continua o casi se vuelve muy importante para el confort térmico.

Las viviendas con una masa térmica adecuada mantendrán una temperatura constante durante más tiempo, utilizando los materiales para acumular el calor o el frío y manteniendo la temperatura a lo largo de las variaciones del ciclo día noche o incluso a lo largo de varios días. Si buscamos una temperatura interior continua para aumentar el confort térmico como es el caso de una vivienda necesitaremos una mayor inercia térmica, pero si por el contrario tenemos un espacio con un uso puntual buscaremos una menor inercia térmica que nos permita enfriarlo y calentarlo rápidamente para su uso.

Para comprender las características de la paja primero deberemos fijarnos en la Capacidad de Calor Específica, que se define como la cantidad de energía requerida para aumentar un kilogramo de un material un grado Kelvin (Atkinson, 2008).

Tabla 6 – Capacidad de Calor Específica de Materiales de Construcción (Atkinson, 2008).

Material	Capacidad de Calor Específica (J/KgK)
Bloques de Hormigón	1000
Enfoscado Tierra	1000
Piedra	720
Tablero de Yeso	840
Madera	1200
Paja	2000

La misma masa de diferentes materiales puede almacenar diferentes cantidades de calor, en esta tabla vemos como la paja es capaz de almacenar hasta el doble de calor que los bloques de hormigón o más del doble que la piedra. Por debemos tener en cuenta también el factor densidad, que nos da una imagen completamente diferente de los datos ya que la paja es un material poco denso en comparación al resto.

No solo debemos tener en cuenta la Capacidad Calórica Específica, debemos también contabilizar el volumen que ocupan estos materiales. Viendo entonces la Capacidad Calórica en función del Volumen nos da una imagen realista de cómo se comportan los materiales en cuanto a inercia térmica, obtenemos así la Capacidad de Almacenamiento Térmico (Minke & Mahlke, 2006).

Tabla 7 – Capacidad Calórica Específica por Volumen (Atkinson, 2008).

Material	Densidad (Kg/m³)	Capacidad Calórica Específica por Volumen (kJ/m³K)
Bloques de Hormigón	2300	2300
Enfoscado de Tierra	1900	1900
Piedra	2180	1570
Tablero de Yeso	950	798
Madera	630	756
Paja	120	250

Al tener en cuenta el factor volumen vemos que la paja tiene una capacidad calórica específica por volumen (Capacidad de Almacenamiento Térmico) inferior a otros materiales más densos. Esto la hace apta para edificios con ocupaciones puntuales, siendo un buen aislante, pero teniendo una baja inercia térmica, o también usado en edificios con una ocupación continua, pero utilizándolo en combinación con otros materiales más densos que puedan aumentar el confort térmico debido a su mayor masa térmica.

Es por esta característica que en el libro Construcción con paja Gernot Minke y Friedmann Mahlke recomiendan el uso de este material con revocos de barro con alto contenido de arena y grava, con un peso específico entre 1900 y 2100 kg/m³ y espesores de 3 a 6cm. Esto se debe a que en este tipo de edificaciones acabados interiores tendrán un gran peso en cuanto a la capacidad de almacenamiento de calor de la edificación. Además, también recomiendan que los tabiques interiores sean realizados con ladrillos de adobe o piedra caliza de unos 11.5 cm de espesor (Minke & Mahlke, 2006).

Sobre el mismo tema el autor Keith Hall en su libro The Green Building Bible hace un interesante análisis sobre cuanta masa térmica es necesaria para que una edificación mantenga de forma efectiva su temperatura a lo largo de 24 horas.

To be effective, thermal mass needs to be well connected with the space. Spreading the mass around the surfaces is much more effective.....During a normal diurnal cycle, 90% of the recoverable heat flow is limited to a depth of about 50mm in dense concrete and 50% to the first 25mm. Thus for thermal storage over a 24 hour time-span there is very little to be gained from very thick concrete masses.

(Hall, 2006, pág. 279)

Basándonos en los datos que ese estudio, que implican que el 90% de la energía que se puede recuperar en todo el día de los materiales serían de 50mm y el 50% de los primeros 25mm, podemos plantearnos que, aunque la paja tenga una capacidad de calor específica por volumen muy baja, alrededor de 250 kJ/m³K, podría ser efectivo en una vivienda con una ocupación continuada el que estuviera recubierta por un enlucido de arcilla de unos 25mm, 1900kJ/m³K.

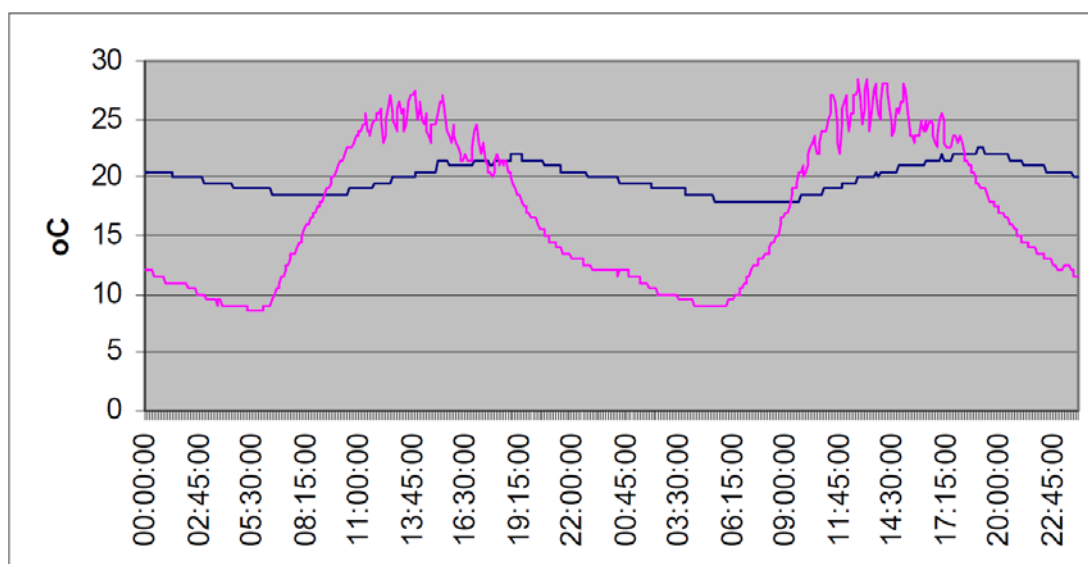


Figura 54. Oscilación Temperatura Interior (línea azul) y Exterior (línea rosa) de una Casa de Paja (Atkinson, 2008, pág. 48).

En la tabla superior observamos el gráfico de análisis de Carol Atkinson sobre la variación de temperatura interior, representada en azul, de una cabaña hecha con fardos de paja (475mm) enlucidos con arcilla (25mm) y de 40m² en planta. La capa de arcilla es aplicada en todos los muros interiores y techos. Los suelos de la vivienda son de madera y no existen elementos que impidan la radiación solar a través de las ventanas al interior. (Atkinson, 2008).

De esta tabla se pueden sacar dos datos, el primero es que la temperatura exterior sufre una variación día/noche de 15°C mientras que la temperatura interior solo varía en 4-5°C, y el segundo es que existe una gran reducción de las temperaturas pico entre las temperaturas externas e internas.

Al comparar estos datos con los que nos ofrece el *Concrete Centre* (Concrete Centre, 2006, pág. 3), sobre el efecto de la masa térmica de una edificación de hormigón y ladrillos en verano, podemos ver como esta vivienda se está comportando de una manera muy similar a una edificación que posee una gran masa térmica. Por tanto, con cierta preocupación por materiales de acabado densos que posean cierto grado de inercia térmica conseguimos una edificación que funcione de manera similar a las tradicionales de estructura de hormigón a pesar de que los muros sean hechos en paja y la estructura en madera.

Hermeticidad:

En los edificios altamente aislados cobra importancia la estanqueidad de la edificación, ya que puede reducirse considerablemente el comportamiento aislante si existen fugas de aire.

Los mayores problemas con la hermeticidad se derivan de fallos en la unión entre paredes y tejado, en la instalación de puertas y ventanas y alrededor de las cajas eléctricas. Planeando con cuidado el diseño de la edificación se pueden eliminar todos estos puntos de fallo, impidiendo la existencia de huecos no previstos (Jones, 2002).

Gernot Minke, en el libro de *Manual de construcción con fardos de paja*, habla además de la importancia de los revocos sin fisuras en los muros de paja, lo cual implica una estanqueidad total y advierte como zonas peligrosas las que, al ejecutarse con estructura de madera, dejan vista la madera. Esto se debe a que en las uniones de ambos materiales es fácil que surjan fisuras si no se trata con el cuidado necesario.

El estudio *Air Tightness of Straw Bale Construction* (Brojan, Weil, & Clouston, 2015) se hace un análisis de la hermeticidad de los muros de paja. Parte de la base del estudio de la permeabilidad de los fardos de paja, para después estudiar como los revocos consiguen la capacidad hermética y hasta que niveles.

Con la primera prueba de comparación entre fardos de paja en vertical vs fardos de paja en horizontal, los resultados muestran que existe una diferencia mínima entre ambas, un 5%. Otro factor que se tuvo en cuenta es la densidad, lo cual tampoco produjo ningún cambio significativo en la permeabilidad.

Tabla 8. Caudal de Aire a una Presión de 50 Pa (Brojan, Weil, & Clouston, 2015, pág. 103).

Estadística	Densidad Kg/m ³	Q (l/s) horizontal	Q (l/s) vertical	Q Δ
Media	84.1	21.5	21.7	-0.2
Desviación Estándar	6.6	2	2.3	2.2
Nº de Muestras	18	18	18	18
Mínimo	86	17.7	16.8	-3.7
Máximo	106	25.6	26.3	3.1

Es muy significativo que con los resultados el estudio afirma que la diferencia entre un fardo de paja y una apertura sin restricciones no es muy diferente y, por tanto, es un material muy permeable al aire.

El segundo experimento de estudio midió la hermeticidad de las paredes de fardos de paja revocadas. El mayor factor a tener en cuenta como variable para poder entender cómo afecta el revoco a la superficie son las fisuras en este, por tanto, se procedió a crear una escala según el tamaño de estas para poder calcular la ratio de agrietamiento por la superficie.

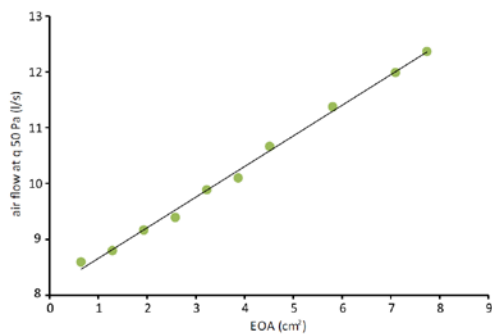


Figura 55. Caudal de Aire en Función de la Superficie de las Grietas (Brojan, Weil, & Clouston, 2015, pág. 106).

La tabla superior son los resultados del test, donde compara el área de las fisuras con el caudal de aire que permiten a través del área de pared testada. Vemos como cuanto mayor sea la superficie, mayor caudal de aire pasa a través de los muros, en una función completamente lineal. Al ser lineal y siendo la hermeticidad de la paja prácticamente nula, implica que toda impermeabilidad al aire que genere un muro de paja viene dada por sus revocos.

Resistencia al Fuego:

Hoy día a pesar de que aún está muy patente en la visión colectiva la imagen de que la paja es un material que arde muy bien, y por tanto debe ser bastante peligroso, poco a poco se va cambiando para el conocimiento de que, salvo por una instalación inadecuada, es un material perfectamente capaz de cumplir las normativas exigibles contra incendios.

Varios autores en sus publicaciones al respecto hablan de la efectividad contra el fuego de los muros de paja como un punto a favor para este material.

En la publicación científica *Barley: Production, Cultivation and Uses*, concretamente en el capítulo 12 *Using Barley Straw as Building Material* (Ashour & Wu), se hace un análisis de diferentes categorías para comprobar la idoneidad de la paja de cebada como material constructivo. Al respecto de la seguridad contra incendios recopila datos del National Research Council of Canada, organismo que determinó ya en 1980 que la paja era más resistente al fuego que la mayoría de los productos convencionales de la construcción. Esto se hizo mediante un teste de resistencia al fuego, consistió en exponer al fuego un fardo de paja recubierto de yeso durante un período prolongado. Al cabo de 4 horas de exposición alcanzó una temperatura máxima de apenas 43 °C (Ashour & Wu).

En el estado de Nuevo México llevaron a cabo un experimento para comprobar la resistencia al fuego de una pared de paja, utilizaron dos paredes de pruebas, una sin ningún tipo de revoco y la otra enyesada por ambas caras (Steen, Bill, & Bainbridge, 1994).

Para la primera pared sin enyesar se expuso a 1000 °F (538 °C) durante cinco minutos, posteriormente 1550 °F (843 °C) durante 30 minutos. Esta temperatura en la cara exterior llevó a que se aumentara 1.97 °F (1.1 °C). Se tardaron 34 minutos en que el fuego alcanzase el centro del muro (9 pulgadas, 23 cm) a través de las juntas de los fardos, en el resto de la pared el fuego era únicamente superficial.

En la segunda prueba la temperatura se mantuvo a 1942 °F (1061 °C) durante 2 horas, las llamas no llegaron a penetrar en el muro y el aumento de temperatura en la cara interna fue de 100 °F (40 °C).

En el libro escrito por Barbara Jones, *Building with Straw Bales*, a la cuestión de los peligros del fuego distingue entre la paja durante el proceso constructivo y una vez que está acabada la obra. El peligro existe únicamente

en la primera fase, durante la construcción, en la que existe peligro de incendio al generarse paja suelta (Jones, 2002).

La paja suelta es la única que tiene la capacidad de arder en caso de ser prendida, ya que tanto la paja compactada en fardos como la revocada no tienen el oxígeno suficiente como para quemarse.

Es por esto que la autora indica que una vez la paja es colocada en un muro actúa más como si el muro entero fuera de madera sólida frente al fuego. Al exponerla al fuego se carboniza por el exterior protegiéndose a sí misma de quemarse por completo.

A todo esto, se le debe añadir la cobertura por ambas caras, la cual aumenta todavía más la protección contra incendios. A efectos regulatorios en UK, un muro construido con cualquier material que esté recubierto de pulgada y media (3,8 cm) de revoco cumple con la hora y media de resistencia al fuego requerida (Jones, 2002).

Esto es similar en legislación a Estados Unidos y Canadá, donde estos muros pasan todas las regulaciones anti incendios, pudiéndose considerar muros anti incendios entre viviendas asociadas. El requerimiento necesario para este tipo de uso es el de recibir ambas caras con media pulgada de yeso (1.27cm).

Aislamiento Acústico:

El factor del que más depende el aislamiento acústico es del peso (densidad) del material de construcción. Cuanta mayor densidad mayor aislamiento acústico. Por tanto, el aislamiento de las paredes de paja revocadas será mejor que el de una pared sin acabado.

El CTE (Código Técnico de la Edificación) exige un mínimo de aislamiento acústico de 45dB en paredes de medianera y dependiendo del índice de ruido día para viviendas contempla entre 30 dB y 47 dB en dormitorios y en el resto de las estancias entre 30 dB y 42 dB (Gobierno de España, 2019).

Para ponerlo en contexto, la Figura 22 muestra una gráfica de las mediciones de aislamiento acústico de un muro de fardos de paja de 45 cm de espesor con una densidad de 120 – 130 kg/m³ y un revoque de tierra de 2.5 cm a 3.5 cm. El experimento fue llevado a cabo en la Universidad Técnica de Eindhoven, Holanda.

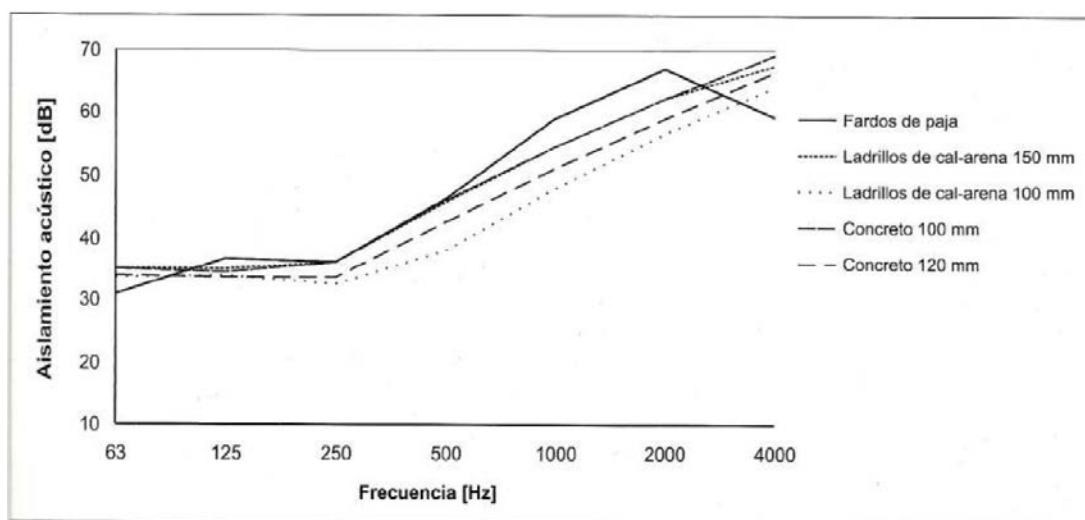


Figura 56. Gráfico Capacidad Aislante a Diferentes Frecuencias de Materiales Constructivos (Minke & Mahlke, 2006, pág. 37).

Un estudio realizado en Australia sobre la transmisión de sonidos realizado en paredes de paja de 45 cm obtuvo una capacidad aislante de 43 a 55 dB en frecuencias entre 500 y 10000 Hz (Minke & Mahlke, 2006). Esto lo situaría dentro de las exigencias de la normativa española.

Humedad:

La humedad es uno de los mayores factores de deterioro en el mantenimiento del edificio, altos niveles de humedad durante periodos prolongados pueden llevar a la pudrición de la paja. A pesar de esto, los edificios de paja pueden durar cientos de años en climas húmedos siempre que se tomen las precauciones necesarias al respecto.

En la literatura de las construcciones con paja se hace hincapié en este apartado, haciendo diferentes clasificaciones de los tipos de humedades que pueden afectar a una vivienda.

En el libro *The Straw Bale House* (Steen, Bill, & Bainbridge, 1994) se explican varias medidas necesarias para evitar problemas de humedad en los muros de paja, además de dejar claro que la humedad es el mayor peligro potencial para una estructura de fardos de paja.

La humedad por exposición directa. Debemos evitar que los muros de paja entren en contacto con el agua. Para esto debemos proteger los muros en la parte alta y baja, ya que son las partes más vulnerables (Steen, Bill, & Bainbridge, 1994).

A este tipo de humedades también se le suele llamar humedades por salpicadura, ya que está ocasionada por la lluvia de forma directa, movida por el viento o bien por la salpicadura que produce en los muros al chocar contra el suelo cerca de estos.

Para dar solución a este problema en el libro *The Straw Bale House*, se propone proteger la parte alta del muro mediante una cubierta y la parte baja elevando los fardos sobre el suelo entre 6 y 8 pulgadas (15 a 20 cm) del suelo como norma general. Adicionalmente, la parte baja de los muros también debe protegerse de posibles salpicaduras y exceso de agua de lluvias mediante una barrera antihumedad debajo del estuco, impidiendo que se moje la paja del interior y la medida anterior de elevación del inicio del muro (Steen, Bill, & Bainbridge, 1994).

En el libro *Casas de paja*, recomienda adicionar un alero a la cubierta para evitar el contacto del agua de lluvia con la pared, y que su rebote en el suelo no la salpique en la parte inferior (Nitzkin & Termens, 2010).

Las partes medias de las paredes de paja no sufren tantos problemas como las partes superiores y bajas. En edificios que han estado sin enyesar cierto

tiempo o indefinidamente no presentan deterioro con la exposición a la lluvia o nieve, esto es debido a que cuando esta superficie se moja se seca rápidamente. Sin embargo, sí que surgen problemas cuando las paredes no pueden secarse por objetos apoyadas en ellas, es por causa de la imposibilidad del secado que se dan casos de pudrición. Por tanto, las paredes siempre deberían poseer la máxima permeabilidad posible para prevenir problemas con la humedad (Steen, Bill, & Bainbridge, 1994).

Humedad por capilaridad. Este tipo de humedad es producido por el ascenso de agua a través de los materiales que componen el muro. Para este caso será necesario la colocación de una lámina impermeabilizante entre el muro y su base (Nitzkin & Termens, 2010).

Humedad por condensación. Especialmente presentes en climas con diferencias de temperatura interior/exterior altas, como en cualquier otra edificación son debidos a zonas donde se producen puentes térmicos condensándose la humedad en un punto.

Para atajar este problema todas las uniones de muros, techos y forjados deben asegurar un aislamiento continuo y se recomienda no utilizar materiales muy conductores como el hierro (Nitzkin & Termens, 2010).

Humedad accidental. Son producidas por cualquier incidente con el abastecimiento de agua y debe ser arreglada de forma inmediata. Es recomendable que el muro esté diseñado para que la paja comience por encima del nivel del pavimento interior, pos si hubiera cualquier tipo de inundación (Nitzkin & Termens, 2010).

Humedad incorporada durante la construcción. Este tipo de humedad se puede agrupar dividir en dos grupos. La humedad que pueden sufrir los fardos de paja debido a la lluvia o humedad del almacenamiento. Y por otro lado, la humedad aportada por materiales húmedos como los revocos, con elevado contenido en agua, que deben secarse de forma controlada.

Existen varios estudios en cuanto a porcentajes de humedades máximos y cuál es la cantidad de humedad recomendada para el correcto mantenimiento de paja encontramos varios.

Taha Ashour y Wei Wu recomiendan un contenido de humedad menor al 15%. Para que se pudieran llegar a desarrollar hongos descomponedores hace falta al menos un 20% de humedad, a pesar de esto la paja no es un material que se descomponga fácilmente y cifran alrededor de un 70% de humedad en adelante lo que sería un hábitat para los hongos (Ashour & Wu).

A la hora de construir un edificio se recomienda una humedad inicial de 10-16% y mantener el contenido de humedad una vez en uso siempre por debajo del 20-25% (Sutton, Clack, & Walker, 2011).

En cuanto a problemas surgidos a partir de la humedad, en la tesis de Jacob Wihan, *Humidity in Straw bale walls and its effect on the decomposition of Straw* (Wihan, 2007), nos encontramos un cuestionario realizado a constructores y arquitectos que tengan experiencia con la paja. El objetivo de este era encontrar las causas más comunes de la pudrición de la paja.

Los resultados de la encuesta al respecto de los problemas de humedad fue que la mayor causa de problemas por humedad viene de una mala instalación de ventanas y puertas, seguido de problemas en el tejado y de lluvias torrenciales. Estas tres categorías son las mayores causas de problemas por humedad en una edificación de paja.

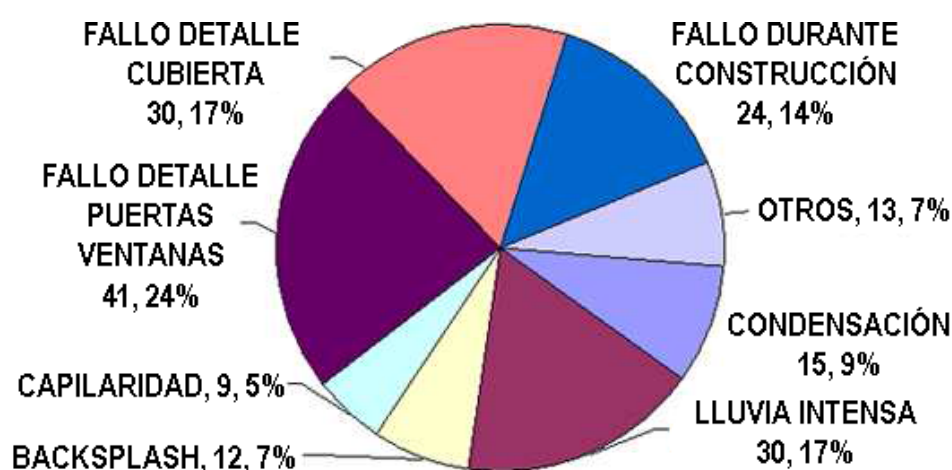


Figura 57. Resultados de la Encuesta Sobre las Causas de los Problemas por Humedad en Muros de Paja (Wihan, 2007, pág. 155).

2.1.7 CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DE LOS PREFABRICADOS DE PAJA Y MADERA

La mayor parte de datos al respecto del uso de los módulos prefabricados son analizados en el capítulo anterior sobre las cualidades físicas de la paja, debido a que es el principal material que los compone. Igualmente se ve la necesidad de añadir un capítulo específico al respecto.

En este capítulo se habla sobre diferentes estudios de investigación o cualidades físicas concretas de los paneles prefabricados cubriendo los aspectos más técnicos de estos.

Importancia del Revoco para la resistencia de los módulos prefabricados:

En el estudio de laboratorio *Racking shear resistance of prefabricated straw-bale panels*, realizado por diferentes académicos de la University of Bath en colaboración con un ingeniero de Oxford se lleva a cabo una investigación sobre módulos prefabricados revocados y su resistencia a la compresión. El objetivo de este estudio es comprobar cuanto contribuye a la rigidez del panel el acabado final añadido en las caras (Lawrence, Drinkwater, Heat, & Walker, 2009).

Este estudio además está motivado por la necesidad de construir edificaciones con una huella de carbono cero, desarrollando y testeando paneles de baja huella de carbono y muy aislantes haciendo uso de la paja, que además es un material renovable.

Los módulos con los que se llevan a cabo el experimento tiene unas dimensiones de 3,2m x 3m y 2m x 2m, su estructura es de madera laminada rellena con fardos de paja y recubierto por una mezcla propia de cal. Los montantes de madera del armazón están hechos con 81mm de espesor de madera contrachapada de 3 capas. Para la paja se ha usado fardos de paja de tamaño estándar (1m x 0,45m x 0,35m) para minimizar al máximo sus cortes. Para la cobertura de las caras se procede a cortar las caras de la paja hasta hacerla uniforme y luego se aplica la capa de cal, que en obra se aplicaría in situ con un espesor mínimo de 30mm.

El revoco ha sido probado con una mezcla estándar y aplicación manual y con una mezcla más húmeda necesaria para la aplicación por pulverización. Se prueban las dos opciones sabiendo que la relación agua/ligante afecta a la resistencia a compresión de los morteros de cal hidráulica.

Los mínimos de resistencia que se buscaban en los paneles, que provienen del *Integral Structural Design* marcan como necesario una resistencia de 10kN (3,1kN/m) de carga sostenida con una deflexión máxima de 10mm, siendo estos datos los considerados máximos en un uso normal.

Los resultados son muy interesantes por el tipo de variables que han decidido estudiar. El resultado de los diferentes tipos de mortero muestra que el mortero proyectado, el cual tenían un contenido mayor de agua, es significativamente más débil que el mortero aplicado manualmente. El mortero en spray tiene una resistencia entre un mortero de cal hidráulico débil (NHL2) y un mortero de cal hidráulico medio (NHL3). A pesar de ser menos resistente que un mortero de cal-cemento (5-8 N/mm²) este mortero sigue contribuyendo de forma significativa a la resistencia a compresión del conjunto.

Tabla 9 – Ensayo a los 90 Días de la Resistencia de Mortero (Lawrence, Drinkwater, Heat, & Walker, 2009)

	Mezcla de Mortero de Cal Normal (125% flow)	Mortero de Cal extra húmedo para aplicación por spray
Resistencia a la Compresión (N/mm ²)	5.88	2,44
Resistencia a la Flexión (Nmm ²)	2,14	1,16

El ensayo de resistencia del panel completo de tamaño 2m x 2m que se lleva a cabo sobre de diferentes formas, sobre únicamente la estructura, sobre la estructura rellena de paja comprimida y sobre la estructura con paja comprimida revocada con el mortero de paja nos permite observar cuanto contribuye cada una de las partes, si es que lo hace, a la resistencia completa del módulo.

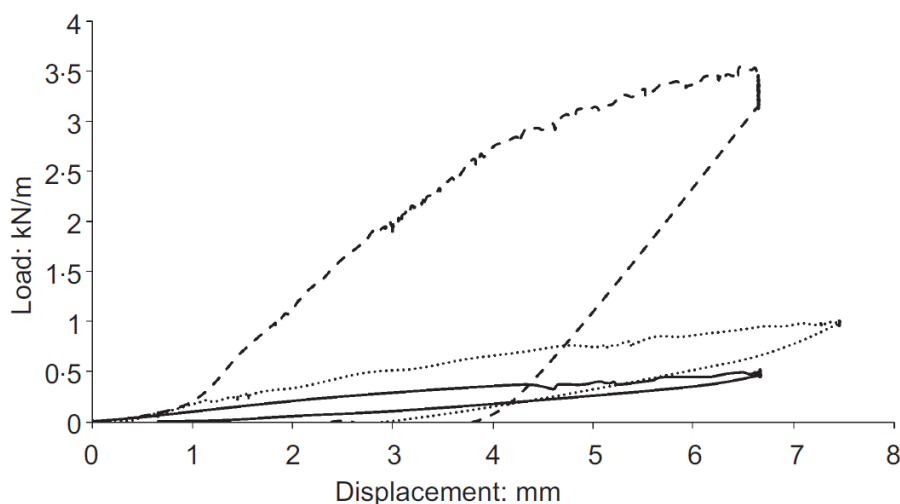


Figura 58. Gráfico Rendimiento Resistencia al Desplazamiento Módulos de Paja 2m x 2m (Lawrence, Drinkwater, Heat, & Walker, 2009).

En la gráfica superior podemos ver los resultados de la prueba de compresión del módulo 2m x 2m, siendo la línea sólida los resultados de la compresión del armazón del módulo, la línea de puntos el armazón con la paja comprimida en su interior y la línea de rayas los datos para el módulo completo con el mortero de cal aplicado en ambas caras exteriores.

Los resultados arrojados por esta prueba indican que con una simple carga de 0.5kN de fuerza el armazón cede 6.5mm evidenciando su falta de rigidez. El añadido de la paja compactada demuestra que incrementa la rigidez del módulo de forma considerable, haciendo que con la misma carga se ceda únicamente 2.7mm. A pesar de este aumento en rigidez el módulo sigue estando muy por encima de lo necesario para poder cumplir con los requerimientos estructurales. Estos requerimientos solo se pueden alcanzar con el recubrimiento de mortero aplicado, alcanzando la máxima rigidez de los tres. A igual cantidad de compresión, 2.7mm, es capaz de soportar una fuerza de 1.8kN/m, mostrando un incremento de un 350% sobre el módulo sin mortero.

Con los módulos de mayor tamaño, 3,2m x 3m se hizo una prueba comparativa de resistencia llevando los módulos al punto de rotura. Para esto se usó un módulo con mortero aplicado en ambas caras y otro con mortero añadiendo unos cables de acero verticales que únicamente ayudan a la sujeción del mortero. El objetivo de estos refuerzos es ayudar a que el mortero pueda trabajar en todo momento a compresión, lo que le ayuda a aumentar su resistencia al disminuir la resistencia al cizallamiento.

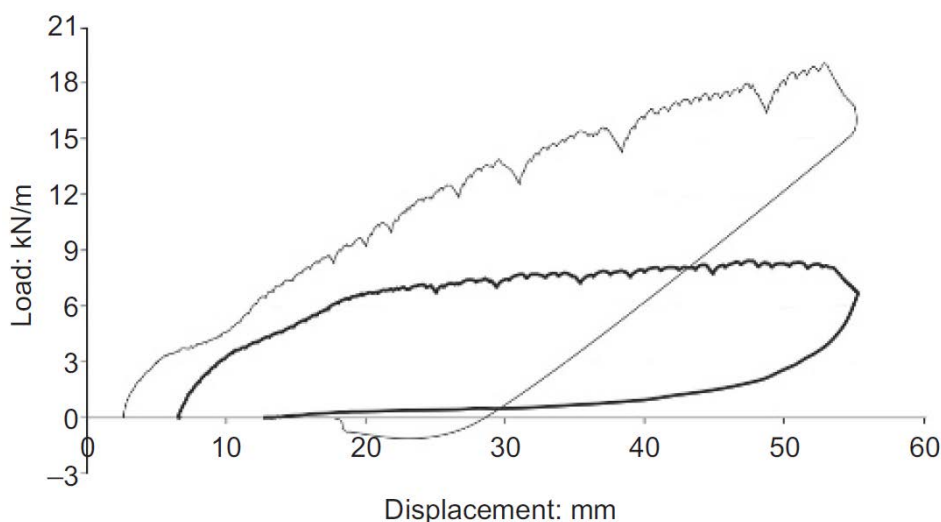


Figura 59. Gráfico de Resistencia a Compresión Hasta Fallo de Paneles Prefabricados con Mortero Aplicado (Lawrence, Drinkwater, Heat, & Walker, 2009).

En línea oscura se muestran los resultados para el módulo de paja sin refuerzos metálicos y en línea gris los resultados del módulo con refuerzos metálicos verticales.

Los resultados muestran que en el test hasta rotura el panel sin refuerzos el mortero exterior se agrieta al llegar a los 6.3kN/m y acaba fallando a los 6.6kN/m. Mientras que en el que tiene refuerzos en el mortero las grietas aparecen a los 7.9kN/m y el fallo completo a los 19.5kN/m.

Estos datos nos muestran la gran importancia que tiene la cobertura de mortero en los paneles prefabricados de paja, aumentando casi por 3 la resistencia a compresión de los mismos.

Como conclusión a los resultados podemos ver como la resistencia a compresión de los paneles se deriva de 3 componentes que lo forman, el armazón, el relleno de paja y el mortero. De estos la estructura de madera contribuye poco a la resistencia, aunque cuando se le añade la paja a compresión llegan a tener una resistencia combinada mejorada. El mortero de cal contribuye de una forma más significativa a la resistencia estructural además de proteger la paja de la pudrición y del fuego.

Estas conclusiones van en línea a las alcanzadas en un estudio anterior llevado a cabo por la universidad de Illinois (Ash, Aschheim, & Mar, 2003), donde podemos observar que la resistencia del revoco exterior del panel es la parte que más afecta a la resistencia del módulo prefabricado, obteniendo como resultado que cuando se refuerza a compresión el mortero para que

signa unido al panel puede incluso llegar a multiplicar su resistencia a compresión.

En este estudio se llevó a cabo un testeo comparativo de la resistencia de paneles revocados con cemento y con tierra diferenciando además las diferentes resistencias según el tipo de sujeción auxiliar para el mortero.

Se testearon módulos de un tamaño de 2,44m x 2,44m con diferentes morteros y refuerzos embebidos en este. En cuanto a números de resistencia total a compresión, ambos estudios obtuvieron resultados son similares, donde el módulo recubierto de tierra sin ningún tipo de refuerzo en el mortero exterior alcanza el punto de rotura a los 5,82kN/m (6,6kN/m (Lawrence et al., 2009)), mientras el que tiene un refuerzo de maya plástica alcanza los 10,94kN/m. Este fenómeno de aumento de resistencia se ve maximizado al combinarlo con un material de mayor resistencia, el cemento, el cual hizo aumentar la resistencia en los módulos probados, alcanzando 11,94kN/m en un módulo reforzado con maya metálica de gallinero. El módulo que alcanzó una mayor resistencia estaba reforzado con malla electro soldada 50mm x 50mm (2mm) alcanzando 34,59kN/m (19,5kN/m (Lawrence et al., 2009)). La contrapartida al uso del cemento sobre la tierra es que fueron los únicos módulos con los que se llegó al punto de fractura dúctil en el ensayo de resistencia sísmica.

2.2 ESTRUCTURA PRODUCTIVA Y DE DISTRIBUCIÓN EN ESPAÑA DE LOS PREFABRICADOS

Para poder entender a fondo la realidad actual de los prefabricados de paja en España debemos estudiar todos los productos que están disponibles en el mercado.

Por la naturaleza del material, que en su mayoría se sigue usando al margen de los sistemas expertos, nos encontramos que ahora mismo existen no solo las empresas ajenas a la obra que se dedican a su fabricación, sino que podemos obtener los paneles prefabricados de diferentes formas.

Por medio de una cooperativa, esto es, un colectivo independiente que busca fomentar determinados fines. Generalmente suelen basarse en el fomento del uso de la paja debido a sus cualidades y el intercambio de conocimientos.

Este sería el caso de la cooperativa Okambuva, la cual se divide en empresa constructora y cooperativa. El objetivo principal de la cooperativa es el fomento de la bioconstrucción profesional y el libre intercambio de conocimientos. Además, apuesta por el uso cooperativo y desarrollo de tecnologías, entre otros objetivos. En cuanto a la división de empresa constructora ejecutan de forma total o parcial obras de bioconstrucción, se especializan en la construcción paja y revestimientos naturales y fabrican módulos prefabricados de paja y madera (Okambuva.coop, 2021).

En este primer caso fabrican ellos mismos los paneles, pero debido a que funcionan también como cooperativa y debido a sus objetivos toda la investigación que realizan está enfocada a ser de “código abierto”. Es por esto que, siendo la primera empresa española que ha desarrollado paneles prefabricados de paja, cualquier persona puede hacer uso de la documentación y características técnicas del proyecto Alfawall y fabricar para uno mismo los paneles.

Este proyecto, Alfawall, surge en Valencia con la intención de solucionar un problema global que se manifiesta de manera local en el territorio de la Albufera, la quema de paja de arroz con su consiguiente perjuicio para el medio ambiente. Lo desarrollan la cooperativa Okambuva junto con la Universidad Politécnica de Valencia, este sistema modular de muros se basa en estructuras de madera que contienen la paja. Mediante fardos de paja prensados con una densidad mínima de 120Kg/m³ y encapsulados en una

estructura de madera permite que estos módulos sean auto portantes y formen la estructura del edificio, aunque también puede funcionar como un sistema de relleno de estructuras preexistente.

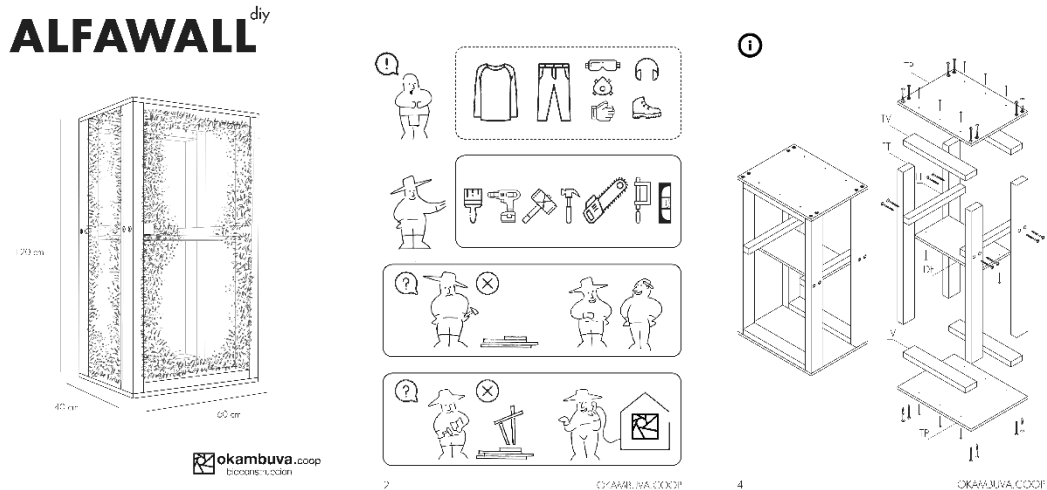


Figura 60. Manual DIY Alfawall (Okambuva.coop, 2021).

Este desarrollo ha estado guiado por experiencias previas en el resto de Europa, como son los estudios de EcoCocon, y uno de sus focos es el mayor ahorro en madera al comprarlo con estos, ya que esto supone un ahorro en los costes de material.

El hecho de la utilización de fardos ya compactados implica no solo una densidad mayor de paja, si no que más importante todavía, un mayor ahorro en inversión técnica en maquinaria para la compactación. Esto hace que la inversión para poder realizarlo en cualquier lugar sea mínima al igual que la tecnología necesaria para llevarla a cabo.

Los módulos se pueden dimensionar de forma específica para cada proyecto, adaptando sus tamaños dentro de los tamaños máximos y mínimos impuestos. Admiten acabados en mortero o cubiertos por madera contrachapada.

Bala-Box, es un sistema sencillo que hace uso de módulos prefabricados de pequeño formato, Pueden encargarse para las obras externas, y ha sido utilizado en múltiples ocasiones por los arquitectos que formaron la empresa. Su sede se encuentra en Madrid (Bala-Box, 2021).



Figura 61. Módulos Bala Box (Bala-Box, 2021).

EcoPaja Bioconstrucción Modular Ecoeficiente (EcoPaja Green Building, 2021) es una empresa con sede en Vitoria-Gasteiz cuya finalidad es el diseño y construcción de viviendas y espacios de trabajo ecológicos que ahorren de forma significativa las emisiones de CO2.

Además, también buscan la eficiencia energética mediante el desarrollo de los “Módulos EcoPaja”, los cuales son de gran formato y están basados en una estructura de madera maciza como elemento estructural y paja de trigo compactada en su interior.



Figura 62. Vivienda de EcoPaja (EcoPaja Green Building, 2021).

Hacen uso de materiales naturales, siguiendo criterios de bioconstrucción, con una mínima huella ecológica alcanzando edificaciones con huellas de carbono negativas.

Comenzaron en 2014 lanzando al mercado su primer prototipo de Módulo EcoPaja, realizando la primera casa de paja de forma industrializada en España.



Figura 63. Plano Localización de las Industrias de Fabricación de Prefabricados con Paja (Autor).

2.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS SOLUCIONES COMERCIALES

Alfawall:

Las características generales de estos módulos prefabricado implican un módulo con funcionalidad auto portante o trabajar como envolvente en cualquier tipo de estructura existente, con limitaciones máximas de tamaño determinadas que puede ser encargada a fábrica o auto fabricada. Sus características son:

Tabla 10 – Características Generales Módulos Alfawall (Okambuva.coop, 2021).

Características Generales Módulos Alfawall	
Madera Estructural	Pino C24
Madera Contrachapada	UNE-EN 314
Paja	Arroz, Trigo, Cebada
Densidad	120 Kg/m ³
Humedad Relativa	<15%
Tornillos	Certificados UNE-EN 10002-1

Tabla 11 – Dimensionamiento de Módulos Alfawall (Okambuva.coop, 2021).

Dimensionamiento de Módulos Alfawall	
Ancho Mínimo	0,5 m
Ancho Máximo	1,2 m
Alto Mínimo	0,5 m
Alto Máximo	2,9 m
Luz Máximo Lintel	2,5 m
Peso Máximo	250 Kg
Volumen Máximo	1 m ³
Inclinación Pendiente para Cubiertas	5%-30%

Tabla 12 – Características Técnicas Módulos Alfawall con revestimiento interno (4cm de arcilla) y externo (4cm arcilla y cal hidráulica natural NHL3.5) de mortero (Okambuva.coop, 2021).

Características Técnicas Módulos Alfawall	
Transmitancia Térmica	0.198 W/m ² C (grosor 25cm)
	0,166 W/m ² C (grosor 35cm)
Conductividad Térmica	0,067 W/mC
Aislamiento Acústico	49 dB
Capacidad de Carga	35 Kn/m
Resistencia al Fuego	RF 90
Factor de Resistencia a la Difusión del Vapor	$\mu = 3-6$

Tabla 13 – Características Medioambientales y del Ciclo de Vida de los Módulos Alfawall (Okambuva.coop, 2021).

Características Medioambientales de los Módulos Alfawall	
Energía primaria embebida (no renovable)	35 kWh/m ²
Potencial de Calentamiento Global	-46 Kg CO ₂ eqv/m ²
Consumo Total Agua	30,4 L

Bala-Box:

Bala-Box es un sistema de prefabricados de paja de formato pequeño diseñado para la construcción y cerramiento de edificaciones, tiene la posibilidad de diseño dentro del estándar “*Passiv House*” y su formato pequeño lo hace apto para la autoconstrucción.

Se realiza mediante el prensado de fardos de paja en posición vertical, aportando la misma capacidad aislante que tumbada. Se apilan de forma contrapeada para dar una mayor estabilidad al muro y posteriormente se unen con tornillería o clavos.

En el caso de edificaciones de pequeño tamaño pueden utilizarse de forma autoportante, siendo estos la estructura de la edificación. Si se necesitan mayores dimensiones se introduce una estructura de pilares de madera funcionando los Bala-Box únicamente de cerramiento.

El acabado final en estos bloques se da una vez finalizado el montaje de los cerramientos, puede ser rematado con mortero de arcilla o cal o recubrir con paneles de diversos tipos haciendo uso de su estructura de madera (Bala-Box, 2021).

Tabla 14 - Características Generales Módulos Bala Box (Bala-Box, 2021).

Características Generales Módulos Bala Box	
Madera Estructural	Abeto C24
Madera Contrachapada	OBS/2
Paja	Trigo
Densidad	120Kg/m ³
Humedad Relativa	<15%

Tabla 15 – Tamaños y Coste Módulos Bala Box (los precios ni incluyen IVA ni transporte) (Bala-Box, 2021).

Dimensiones y Coste de Módulos Bala Box					
ART	DESCRIPCIÓN	MEDIDAS	PESO	PRECIO UD	UDS PALLET
BB90	Bloque Bala-Box de 90cm	90x49x35 cm	22 Kg	30	12 Uds/pallet
BB55	Bloque Bala-Box de 55cm	90x49x35 cm	14 Kg	18	24 Uds/pallet
BB35	Bloque Bala-Box de 35cm	90x49x35 cm	8 Kg	12	36 Uds/pallet

Tabla 16 – Características Técnicas Módulos Bala Box (con revestimiento no especificado) (Bala-Box, 2021).

Características Técnicas Módulos Bala Box	
Transmitancia Térmica	0.15 W/m ² C (grosor 35cm)
Conductividad Térmica	0,05 W/mC
Aislamiento Acústico	49dB
Capacidad de Carga	4Tn/ml
Resistencia al Fuego	RF 90 min

Módulo EcoPaja:

Son módulos de gran formato, su estructura está compuesta por madera maciza y en su interior añaden paja de trigo compactada.

Tabla 17 – Características Generales de los Módulos EcoPaja (EcoPaja Green Building, 2021).

Características Generales Módulos EcoPaja	
Paja	Trigo
Densidad	135 – 185 kg/m ³
Humedad Relativa	<15%

Tabla 18 – Dimensionamiento de los Módulos EcoPaja (EcoPaja Green Building, 2021).

Dimensionamiento de Módulos EcoPaja	
Módulo Estándar Horizontal	2,45 x 1,20 x 0,45 m
Módulo Estándar Vertical	1,23 x 2,45x 0,45 m
Módulo Estándar Unión Esquinas	2,45 x 0,45 x 0,45 m
Grosor Módulos Sin Acabado	0,45 m

Tabla 19 – Características Técnicas de los Módulos EcoPaja (EcoPaja Green Building, 2021).

Características Técnicas Módulos EcoPaja	
Transmitancia Térmica	0,144 W/m ² C (grosor 45cm)
Conductividad Térmica	0,068 W/mC
Aislamiento Acústico	49 dB
Capacidad de Carga	Kn/m
Resistencia al Fuego	REI 120 (150´)
Resistencia a Carga Horizontal	45 tn
Carga Horizontal de Rotura	579,42 Kn/m ²
Resistencia a Carga Vertical	33 tn
Carga Vertical de Rotura	332,93 Kn/m ²

*Figura 64.
Construcción
Muro de Paja
(Miren, 2021).*



3 SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN USO EN ESPAÑA

3.1 Sistema de Muros Portantes o Sistema Nebraska

3.2 Sistema de Postes y Vigas o de Relleno

3.3 Sistema CUT

3.4 Prefabricado

3.5 Análisis Comparativo de los Sistemas Constructivos

La arquitectura en paja a nivel global ha llegado a adquirir una presencia notable, existiendo numerosos ejemplos contruidos y publicaciones al respecto. Países como Francia e Inglaterra han conseguido, gracias al apoyo de los gobiernos y a diferentes iniciativas privadas, un nivel de desarrollo constructivo y de técnica que les permite avanzar y explorar en este tipo de construcciones, llegando incluso a innovar en el sector.

Esta realidad es muy diferente a nivel español, donde los ejemplos son mucho menos numerosos y los profesionales dedicados a hacer este tipo de construcciones escasean. En el caso particular de Galicia se ha podido localizar un único ejemplo de arquitectura en paja, una ampliación de una vivienda con uso hostelero.

Esto trae la dificultad añadida de encontrar información al respecto, ya que gran parte de las edificaciones actuales llevadas a cabo con paja son de carácter auto constructivo, implicando la prescindencia del proyecto de arquitectura, así como la imposibilidad de recabar información que sea posible analizar y comparar.

Es por esta razón que sistemas constructivos más comunes en el mundo profesional como la prefabricación o el sistema de postes y vigas disponen de un mayor número de ejemplares disponibles con más información al respecto.

Por estas razones, resulta necesario el análisis de proyectos reales llevados a cabo en España, para poder recabar información sobre ellos y poder comparar la adecuación de cada uno de ellos según los diferentes objetivos de proyecto. Consiguiendo con esto una información necesaria y no disponible para los arquitectos a la hora de llevar a cabo un proyecto, orientándolos a la hora de decidir sobre el sistema constructivo a utilizar en función de las necesidades programáticas.

El objetivo de la utilización de diferentes casos es el de estudiar cada una de las categorías de análisis y aportar información mediante la comparativa de las diferentes características dominantes en cada tipo de proyecto.

Para realizar este análisis se tendrán en cuenta proyectos contruidos mayoritariamente con paja, que hagan uso de los diferentes sistemas constructivos con fardos de paja, así como de las técnicas contemporáneas, en los que debe existir un proyecto de arquitectura y por tanto no sean proyectos de autoconstrucción que prescinden del proyecto arquitectónico.

Las tipologías que se buscan estudiar son las viviendas unifamiliares, construidas en los últimos 20 años en el territorio español. El objetivo es analizar 3 proyectos en cada uno de los cuatro sistemas constructivos a analizar y comparar, Sistema de Muros Portantes, Sistema de Postes y Vigas, Sistema CUT y Sistema de Prefabricados.

Para llevar a cabo el análisis se utilizarán 3 categorías con el fin de organizar la información. Categoría de información general, busca responder a los datos básicos del proyecto. Información espacial, en la cual se recaba la información sobre la distribución y morfología de la edificación. Información constructiva, reúne los datos más técnicos del modo de construcción, permitiendo de una forma muy directa la comparación de sus datos entre sistemas.

Dentro de cada una de las categorías se han escogido los indicadores más importantes para alcanzar un conocimiento a fondo de los proyectos, así como los que permitan en el subcapítulo de análisis la comparativa en función de las características derivadas de las especificidades de cada método constructivo.

INFORMACIÓN GENERAL

DENOMINACIÓN PROYECTO
VIVIENDA EN BUSTARVIEJO

TIPOLOGÍA
VIVIENDA UNIFAMILIAR

AÑO CONSTRUCCIÓN
2017- ACTUALIDAD

ARQUITECTO
ALFONSO ZAVALA

LOCALIZACIÓN
BUSTARVIEJO, EL PEDREGAL,
MADRID

ZONA CLIMATOLÓGICA
CSB, MEDITERRÁNEO

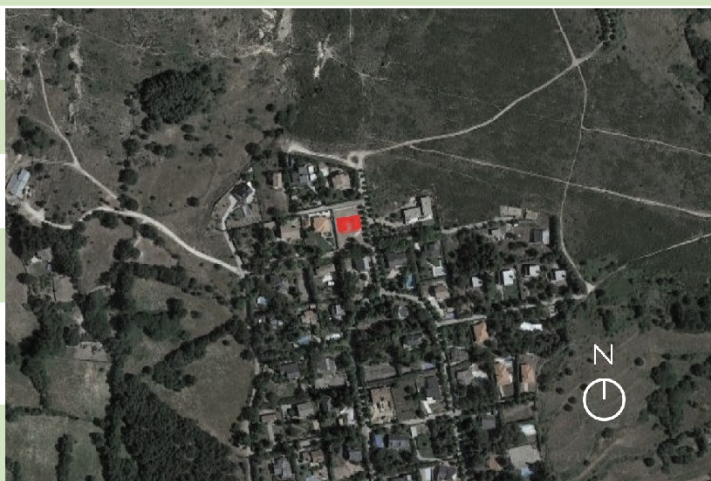


Figura 66. Localización Vivienda en Bustarviejo (de Autor).

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO
SITUADA BAJO UN MACIZO GRANÍTICO, ESTÁ ORIENTADA AL SUR Y CON AMPLIAS VISTAS. GEOMETRÍA EN U ABIERTA HACIA EL SUR FORMANDO UNA TERRAZA EN EL CENTRO, DISPONE ADEMÁS DE UN SEMISÓTANO DEBIDO AL DESNIVEL DE LA PARCELA.

INFORMACIÓN ESPACIAL

SUPERFICIE CONSTRUIDA
130 M2 VIVIENDA + 105 M2 GARAJE, TOTAL 235 M2

Nº DE PLANTAS
1

MORFOLOGÍA
EDIFICIO EN FORMA DE U, QUE SE EXTIENDE CON UNA TERRAZA CONFORMANDO UN SEMISÓTANO INTERIOR Y CUBIERTAS NO MUY PENDIENTES HACIA EL EXTERIOR.

PROGRAMA FUNCIONAL
VIVIENDA UNIFAMILIAR EN LA CUAL SE ACCEDE A UN VESTÍBULO DISTRIBUIDOR, DES-DE AHÍ SE ACCEDE A LA TERRAZA, AL SALÓN COMEDOR COCINA, AL BAÑO Y AL PASILLO DE ACCESO A LOS DORMITORIOS.
LA ENTRADA EN COCHE SE HACE POR EL LADO ESTE, QUE VA AL GARAJE DEL SEMISÓTANO, EL ACCESO PEATONAL PRINCIPAL ESTÁ SITUADO AL NORTE.

Nº HABITACIONES
1 SALÓN COMEDOR COCINA, 2 BAÑOS, 2 HABITACIONES, 1 TERRAZA, 1 VESTÍBULO

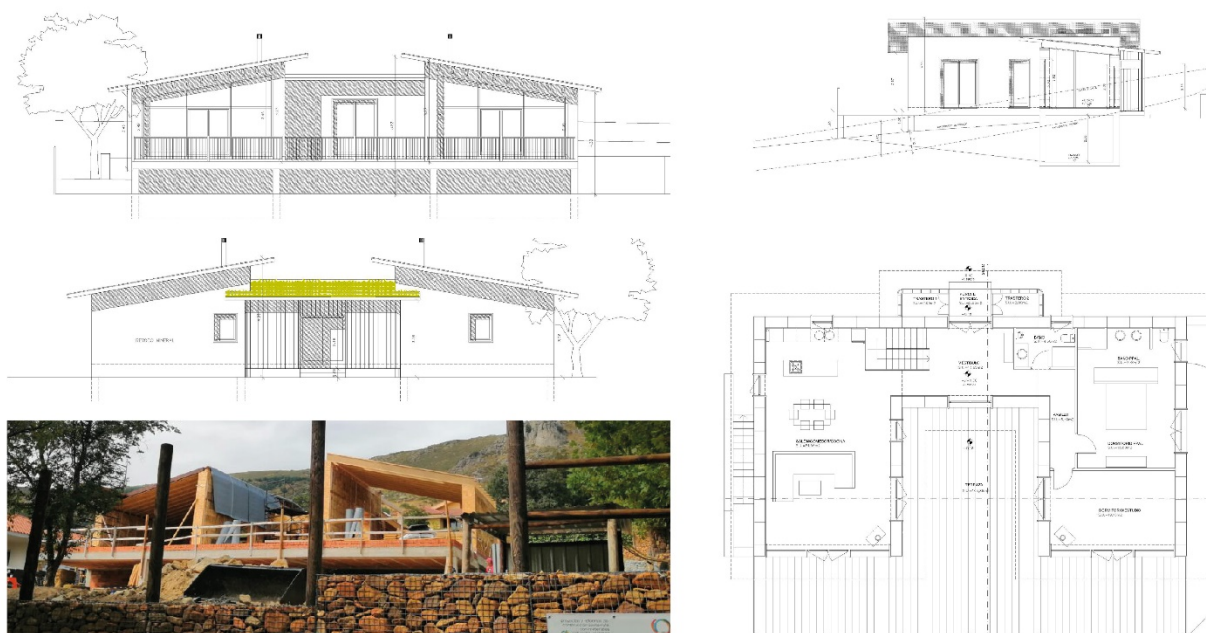


Figura 65. Fotografía Exterior Bustarviejo (Alen y Calche, s.f.).

INFORMACIÓN CONSTRUCTIVA

SISTEMA PAJA UTILIZADO
SISTEMA NEBRASKA

LUZ MÁXIMA
5.5 M

CIMENTACIÓN
MURO DE CIMENTACIÓN EN HORMIGÓN
SOLERA ELEVADA SOBRE TERRENO 30 CM-1.4 M
SOBRECIMENTOS 2 HILERAS DE LADROLLO PERFORADO CON AISLANTE ENTRE
AMBOS 20CM + ZUNCHO DE MADERA 10CM, TOTAL DE 30CM

FORJADO
FORJADO DE HORMIGÓN.

ESTRUCTURA
CIMENTACIÓN EN HORMIGÓN. PARAMENTOS EXTERIORES AUTOPORTANTES, HECHOS
A BASE DE FARDOS DE PAJA COMPACTADOS CON UNA VIGA PERIMETRAL SUPERIOR EN
MADERA. CUBIERTA EN ESTRUCTURA DE MADERA.

PARAMENTOS EXTERIORES
GROSOR 50CM, MORTERO DE CAL EN INTERIOR, RECOCO DE CAL EN EL EXTERIOR, NO
HAY USO DE AISLAMIENTO EXTRA.

APERTURAS
10 VENTANAS, 2 PUERTAS, 12 TOTAL. TAMAÑO MÁXIMO 5.4M X 2.4M.

CUBIERTA
CUBIERTA A UN AGUA, REMATADA EN ZINC, VOLVADIZO DE 0.8M.

CLASIFICACIÓN ENERGÉTICA
CLASE A

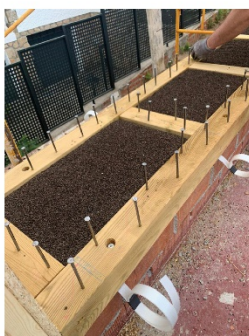


Figura 67. Imágenes Construcción Bustarviejo (Alen y Calche, s.f.).

3.1 SISTEMA MUROS PORTANTES O NEBRASKA

2/3

INFORMACIÓN GENERAL

DENOMINACIÓN PROYECTO
CASA BODONAL

TIPOLOGÍA
VIVIENDA UNIFAMILIAR

AÑO CONSTRUCCIÓN
2017

ARQUITECTO
OFICINA MIGA

LOCALIZACIÓN
BODONAL DE LA SIERRA, BADAJOZ

ZONA CLIMATOLÓGICA
CFB, OCEÁNICO

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO
VIVIENDA AUTOCONSTRUIDA CON SISTEMA NEBRASKA, DE PEQUEÑO TAMAÑO. CONSTRUIDA EN 2 SEMANAS, TANTO LA PAJA COMO LA TIERRA DE LOS REVOCOS PROVIENE DE MENOS DE 100KM DE DISTANCIA.



INFORMACIÓN ESPACIAL

SUPERFICIE CONSTRUIDA
45 M²

Nº DE PLANTAS
1

MORFOLOGÍA
PLANTA RECTANGULAR CON EL TEJADO A DOS AGUAS.

PROGRAMA FUNCIONAL
POSEE UN SALÓN COMEDOR COCINA, CON UNA HABITACIÓN Y BAÑOS SEPARADOS.

Nº HABITACIONES
1 SALÓN COMEDOR COCINA, 1 BAÑOS, 1 HABITACIÓN.

INFORMACIÓN CONSTRUCTIVA

SISTEMA PAJA UTILIZADO
SISTEMA NEBRASKA

LUZ MÁXIMA
6.25M

CIMENTACIÓN
SOLERA ELEVADA SOBRE TERRENO 10 CM
SOBRECIMENTOS EN LADRILLOS, 20CM + ZUNCHO DE MADERA 10CM, TOTAL DE 30CM

FORJADOS
SOLERA HORMIGÓN

ESTRUCTURA
FARDOS DE PAJA PRENSADOS

PARAMENTOS EXTERIORES
GROSOR 45CM, REVOCO DE TIERRA INTERIOR Y EXTERIOR, NO HAY USO DE AISLAMIENTO EXTRA

APERTURAS
2 VENTANAS, 1 PUERTAS, 3 TOTAL. TAMAÑO MÁXIMO 2M X 0.8M.

CUBIERTA
CUBIERTA A DOS AGUAS, REMATADA EN TEJA, VOLVADIZO DE 0.5M.

CLASIFICACIÓN ENERGÉTICA
CLASE A

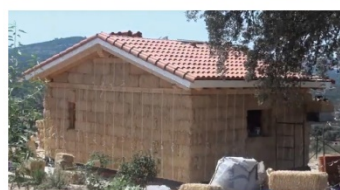


Figura 68. Imágenes Construcción Casa Bonadal (Miga Oficina Rural de Arquitectura, 2021).

3.1 SISTEMA MUROS PORTANTES O NEBRASKA

3/3

INFORMACIÓN GENERAL

DENOMINACIÓN PROYECTO
VIVIENDA EN PORRERES

TIPOLOGÍA
VIVIENDA UNIFAMILIAR

AÑO CONSTRUCCIÓN
2012-2014

ARQUITECTO
MIGUEL A. R. NEVADO
JOAN BRUNET ALÓS

LOCALIZACIÓN
PORRERAS, MALLORCA.

ZONA CLIMATOLÓGICA
CSB, MEDITERRÁNEO

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO
VIVIENDA SIMPLE Y FUNCIONAL DONDE VIVIR EN ARMONÍA CON EL ENTRONO. SU DISEÑO BIOCLIMÁTICO APROVECHA LA LUZ DEL SOL EN INVIERNO, SUMADO A LOS MUROS PERIMETRALES EN PAJA Y EL CENTRAL EN PIEDRA.



INFORMACIÓN ESPACIAL

SUPERFICIE CONSTRUIDA
150 M²

Nº DE PLANTAS
1

MORFOLOGÍA
PLANTA RECTANGULAR CON EL TEJADO A DOS AGUAS.

PROGRAMA FUNCIONAL
POSEE UN SALÓN COMEDOR, UN PASILLO QUE DISTRIBUYE A LA COCINA, BAÑO Y HABITACIONES.

Nº HABITACIONES
1 SALÓN COMEDOR, 1 COCINA, 2 BAÑOS, 3 HABITACIÓN.

INFORMACIÓN CONSTRUCTIVA

SISTEMA PAJA UTILIZADO
SISTEMA NEBRASKA

LUZ MÁXIMA
5 M

CIMENTACIÓN
SOLERA ELEVADA SOBRE TERRENO 10 CM - 40 CM
SOBRECIMENTOS EN LADRILLOS, 20CM + ZUNCHO DE MADERA 10CM, TOTAL DE 30CM

FORJADOS
SOLERA HORMIGÓN

ESTRUCTURA
FARDOS DE PAJA PRENSADOS

PARAMENTOS EXTERIORES
GROSOR 45CM, REVOCO DE ARCILLA Y CAL, NO HAY USO DE AISLAMIENTO EXTRA

APERTURAS
12 VENTANAS, 4 PUERTAS, 16 TOTAL. TAMAÑO MÁXIMO 2M X 0.8M.

CUBIERTA
CUBIERTA A DOS AGUAS, REMATADA EN TEJA, VOLVADIZO DE 0.5M.

CLASIFICACIÓN ENERGÉTICA
CLASE A



Figura 69. Imágenes Construcción Casa Porreres (Sala Nowotny, 2021).

INFORMACIÓN GENERAL

DENOMINACIÓN PROYECTO
VIVIENDA EN BATRES

TIPOLOGÍA
VIVIENDA UNIFAMILIAR

AÑO CONSTRUCCIÓN
2019

ARQUITECTO
ALFONSO ZAVALA

LOCALIZACIÓN
BATRES, COTORREDONDO,
MADRID

ZONA CLIMATOLÓGICA
CSA, MEDITERRÁNEO



DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

VIVIENDA DE AUTOCONSTRUCCIÓN PARCIAL, CON ORIENTACIÓN SUR Y RODEADA DE ARBOLADO. SE OPTA POR UN DISEÑO PRÁCTICO Y SENCILLO DE EJECUTAR. SE UTILIZA EL SISTEMA CUT EN CONJUNTO CON UN TECHO PLANO DE VIGAS DE MADERA VISTAS Y TERMINACIÓN CON CUBIERTA VEGETAL

INFORMACIÓN ESPACIAL

SUPERFICIE CONSTRUIDA
155 M2 VIVIENDA

Nº DE PLANTAS
1

MORFOLOGÍA

LAS DOS PLANTAS SON REGULARES CON FORMA RECTANGULAR, SIENDO LA PLANTA BAJA MÁS EXTENSA EN SUPERFICIE.

PROGRAMA FUNCIONAL

SALÓN-COMEDOR-COCINA INTEGRADOS EN UN GRAN ESPACIO EN PLANTA BAJA, A LOS QUE SE SUMAN UN BAÑO, UNA HABITACIÓN Y LAS ESCALERAS A LA PLANTA SUPERIOR MEDIANTE UN DISTRIBUIDOR EN UN EXTREMO. EN EL LADO OPUESTO ESTÁ EL PORCHE, QUE SIRVE COMO APARCAMIENTO. LA PLANTA SUPERIOR SE ORGANIZA ALREDEDOR DE UN DISTRIBUIDOR, EL CUAL PERMITE ACCEDER OTRO BAÑO Y DOS HABITACIONES. DE ESTAS UNA DE ELLAS ES LA PRINCIPAL DE LA CASA Y DISPONE DE BAÑO PROPIO

Nº HABITACIONES

1 SALÓN COMEDOR COCINA, 2 BAÑOS, 3 HABITACIONES, 1 LAVADERO, 1 PORCHE

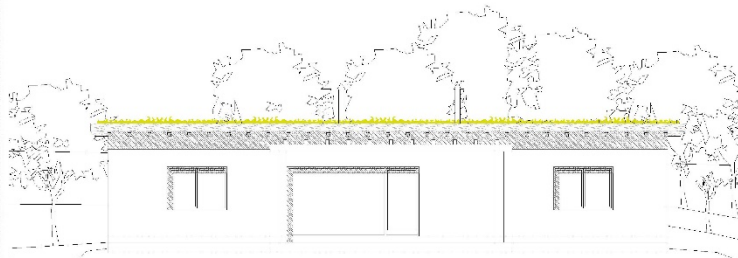
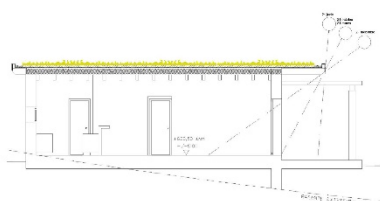
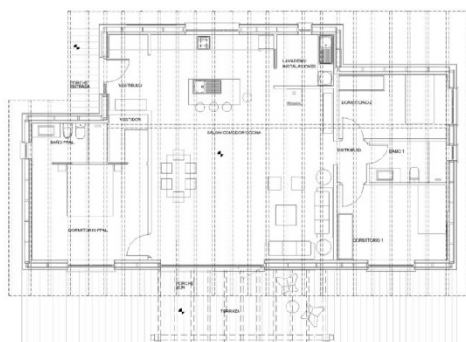


Figura 70. Plantas y Fotografías Vivienda en Batres (Alen y Calche, s.f.).

INFORMACIÓN CONSTRUCTIVA

SISTEMA PAJA UTILIZADO
ISTEMA DE POSTES Y VIGAS

LUZ MÁXIMA
7.4M

CIMENTACIÓN
MURO DE CIMENTACIÓN DE HORMIGÓN Y ZAPATA CORRIDA
SOLERA ELEVADA SOBRE TERRENO 30CM
NO SE USAN SOBRECIMENTOS, ÚNICAMENTE IMPERMEABILIZANTE BAJO EL EMPIECE DEL MURO
TOTAL DE 30CM SOBRE EL TERRENO

FORJADOS
SOLERA DE HORMIGÓN SOBREELEVADA SOBRE CASETONES.

ESTRUCTURA
VIGAS Y PILARES EN MADERA. MURO INTERIOR EN LADRILLO MACIZO. CUBIERTA EN MADERA.

PARAMENTOS EXTERIORES
GROSOR 40CM, REVOCO DE ARCILLA EN INTERIOR, RECOCO DE CAL EN EL EXTERIOR, NO HAY USO DE AISLAMIENTO EXTRA.

APERTURAS
8 VENTANAS, 2 PUERTAS, 10 TOTAL. TAMAÑO MÁXIMO 4.2M X 2.2M.

CUBIERTA
CUBIERTA PLANA AJARDINADA EN MADERA, VOLVADIZO DE 0.5M.

CLASIFICACIÓN ENERGÉTICA
CLASE A



Figura 71. Fotografías Vivienda en Batres (Alen y Calche, s.f.).

INFORMACIÓN GENERAL

DENOMINACIÓN PROYECTO
VIVIENDA EN BORREDÀ

TIPOLOGÍA
VIVIENDA UNIFAMILIAR

AÑO CONSTRUCCIÓN
2020

ARQUITECTO
MIRCO ZECCHETTO, IVÁN AGUILAR

LOCALIZACIÓN
BORREDÀ, BERGADÀ, CATALUÑA

ZONA CLIMATOLÓGICA
CFB, OCEÁNICO



DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO
VIVIENDA DE DOS PLANTAS UNIFAMILIAR DE DISEÑO SENCILLO, CON VOLUMETRÍA TRADICIONAL, REVOCADA EN TIERRA.

INFORMACIÓN ESPACIAL

SUPERFICIE CONSTRUIDA
130 M2 VIVIENDA

Nº DE PLANTAS
2

MORFOLOGÍA
PLANTA CUADRADA, IGUAL EN AMBAS ALTURAS

PROGRAMA FUNCIONAL
DATOS NO DISPONIBLES

Nº HABITACIONES
DATOS NO DISPONIBLES



Figura 72. Fotografías Vivienda Borredà (Zecchetto, 2021).

INFORMACIÓN CONSTRUCTIVA

SISTEMA PAJA UTILIZADO
SISTEMA DE POSTES Y VIGAS

LUZ MÁXIMA
5M

CIMENTACIÓN
VIGA DE CIMENTACIÓN
SOLERA ELEVADA SOBRE TERRENO 10CM
SOBRECIMENTOS DE DOS HILERAS DE TERMOARCILLA REMATADA CON UNA TELA IMPERMEABLE, 30 CM
TOTAL DE 40CM SOBRE EL TERRENO

FORJADOS
SOLERA DE HORMIGÓN.

ESTRUCTURA
ESTRUCTURA COMPLETA EN MADERA, PILARES Y FORJADO DEL PRIMER PISO EN MADERA. ESTRUCTURA DEL TEJADO EN MADERA.

PARAMENTOS EXTERIORES
GROSOR 40CM, REVOCO DE ARCILLA EN INTERIOR Y EN EL EXTERIOR, NO SE USA AISLAMIENTO EXTRA.

APERTURAS
12 VENTANAS, 2 PUERTAS, 14 TOTAL. TAMAÑO MÁXIMO 2.4M X 1.2M.

CUBIERTA
CUBIERTA A DOS AGUAS TERMINADA EN TEJA TRADICIONAL, LOGITUD DEL VOLADIZO 1.2M.

CLASIFICACIÓN ENERGÉTICA
DATOS NO DISPONIBLES



Figura 73. Fotografías Vivienda Borredà (Zecchetto, 2021).

3.2 SISTEMA DE POSTES Y VIGAS O RELLENO

3/3

INFORMACIÓN GENERAL

DENOMINACIÓN PROYECTO
VIVIENDA EN GIJÓN

TIPOLOGÍA
VIVIENDA UNIFAMILIAR

AÑO CONSTRUCCIÓN
2014-2016

ARQUITECTO
IÑAKI URKÍA EN COLABORACIÓN CON
EL DUEÑO AUTOCONSTRUCTOR.

LOCALIZACIÓN
GIJÓN, ASTURIAS

ZONA CLIMATOLÓGICA
CFB, OCEÁNICO



DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

VIVIENDA DE UNA ÚNICA PLANTA, CONSTRUIDA CON UNA ESTRUCTURA DE MADERA RELLENA DE FARDOS DE PAJA.
SU DISEÑO SE BASA EN EL FLEXÁGONO IDEADO POR TOM RIJVEN, BIOCONSTRUCTOR HOLANDÉS

INFORMACIÓN ESPACIAL

SUPERFICIE CONSTRUIDA
135 M2 VIVIENDA

Nº DE PLANTAS
1

MORFOLOGÍA
HEXÁGONO CENTRAL DE MAYOR ALTURA, RODEADO DE MEDIO HEXÁGONO DE MENOR ALTURA CON LA CUBIERTA INCLINADA HACIA EL EXTERIOR.

PROGRAMA FUNCIONAL
SE ACCEDE A UN SALÓN COCINA QUE DISTRIBUYE EL RESTO DE LAS HABITACIONES. ESTÁ UNIDO AL COMEDOR Y DA ACCESO A LAS HABITACIONES, AL BAÑO Y AL DESPACHO.

Nº HABITACIONES
1 SALÓN COCINA, 2 BAÑOS, 2 HABITACIONES, 1 COMEDOR, 1 DESPACHO

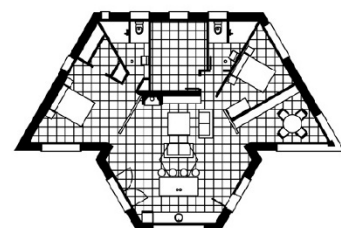
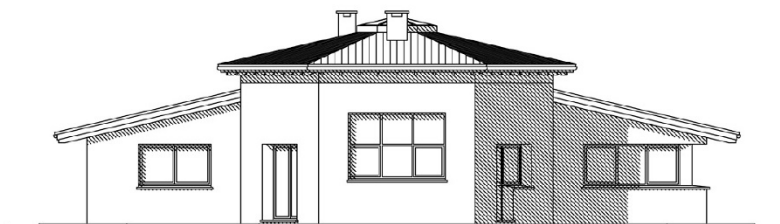
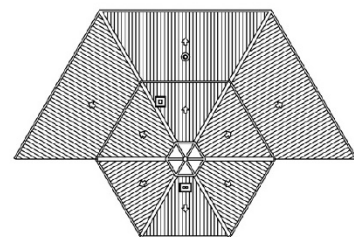


Figura 74. Planos y Fotografía Vivienda de Gijón (Fresno, 2014).

INFORMACIÓN CONSTRUCTIVA

SISTEMA PAJA UTILIZADO
ISTEMA DE POSTES Y VIGAS

LUZ MÁXIMA
7M

CIMENTACIÓN
ZAPATA CORRIDA DE HORMIGÓN
SOLERA ELEVADA SOBRE TERRENO 10CM
SOBRECIMENTOS FORMADOS POR UNA HILERA DE TERMOARCILLA CUBIERTA EN SU PARTE SUPERIOR CON UNA TELA DE IMPERMEABILIZACIÓN TOTAL DE 40CM SOBRE EL TERRENO

FORJADOS
SOLERA DE HORMIGÓN SOBREELEVADA SOBRE CASETONES.

ESTRUCTURA
FORJADO SANITARIO EN HORMIGÓN, ESTRUCTURA EN MADERA.

PARAMENTOS EXTERIORES
GROSOR 50CM, REVOCO DE ARCILLA EN INTERIOR, RECOCO DE CAL EN EL EXTERIOR, NO HAY USO DE AISLAMIENTO EXTRA.

APERTURAS
12 VENTANAS, 2 PUERTAS, 14 TOTAL. TAMAÑO MÁXIMO 2.5M X 1.4M.

CUBIERTA
CUBIERTA RECÍPROCA HEXAGONAL, CON ACABADO EN TEJA. LONGITUD DEL VOLADIZO 1.2M.

CLASIFICACIÓN ENERGÉTICA
CLASE A

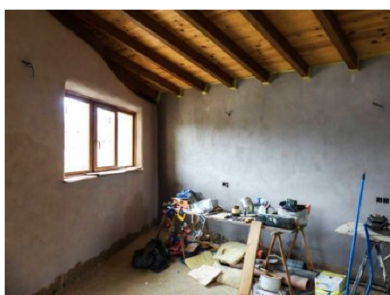


Figura 75. Fotografía Vivienda de Gijón (reBive, s.f.).

INFORMACIÓN GENERAL

DENOMINACIÓN PROYECTO
VIVIENDA EN SEVILLA LA NUEVA

TIPOLOGÍA
VIVIENDA UNIFAMILIAR

AÑO CONSTRUCCIÓN
2016-2018

ARQUITECTO
ALFONSO ZAVALA

LOCALIZACIÓN
LOS CORTIJOS. SEVILLA LA
NUEVA, MADRID

ZONA CLIMATOLÓGICA
CSA, MEDITERRÁNEO



DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

SE PRESENTA COMO UN VOLUMEN MACIZO DE POCA ALTURA, CON PAREDES CURVAS PARA INTEGRARSE EN EL ENTORNO, UN EXTENSO ENCINAR A SU ALREDEDOR. REMATADO POR UNA CUBIERTA A DOS AGUAS QUE CUBRE TODO EL CONJUNTO, EXTENDIÉNDOSE SOBRE PARTE DEL PORCHE DELANTERO. SE ABREN VENTANAS DE PEQUEÑO TAMAÑO EN TODAS LAS PARECES DE LA CASA, RESERVANDO LAS DE GRAN TAMAÑO PARA LA TERRAZA.

INFORMACIÓN ESPACIAL

SUPERFICIE CONSTRUIDA
110 M2 VIVIENDA

Nº DE PLANTAS
1

MORFOLOGÍA

PLANTA PENTAGONAL ORGÁNICA CON TODAS SUS ESQUINAS REDONDEADAS Y LAS PAREDES CURVAS PARA AYUDAR A LA INTEGRACIÓN EN EL PAISAJE, BAJA ALTURA.

PROGRAMA FUNCIONAL

VIVIENDA UNIFAMILIAR EN LA CUAL SE ACCEDE A UN HALL DISTRIBUIDOR QUE DA A AL ÚNICO BAÑO DE LA CASA Y AL GRAN ESPACIO DE DÍA. ESTE ESPACIO CONCENTRA EL SALÓN, EL COMEDOR Y LA COCINA Y A SU VEZ DA PASO A LOS DOS DORMITORIOS DE LA CASA.

AL HALL DE ENTRADA SE LLEGA POR UN CAMINO HACIA EL CUAL ÚNICAMENTE SE ABRE LA PUERTA, AL LADO OPUESTO Y DESDE EL SALÓN SE ABRE OTRA PUERTA HACIA EL EXTERIOR DONDE SE ALARGA EL TEJADO CREANDO UN PORCHE SOBRE PARTE DE LA TERRAZA EXTERIOR.

Nº HABITACIONES

1 SALÓN COMEDOR COCINA, 1 BAÑOS, 2 HABITACIONES, 1 TERRAZA CON PORCHE, 1 HALL DE ENTRADA.

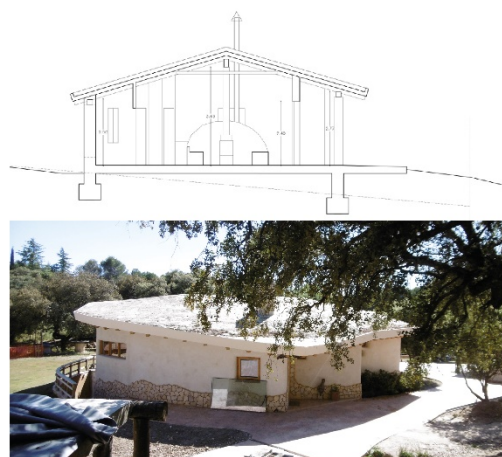
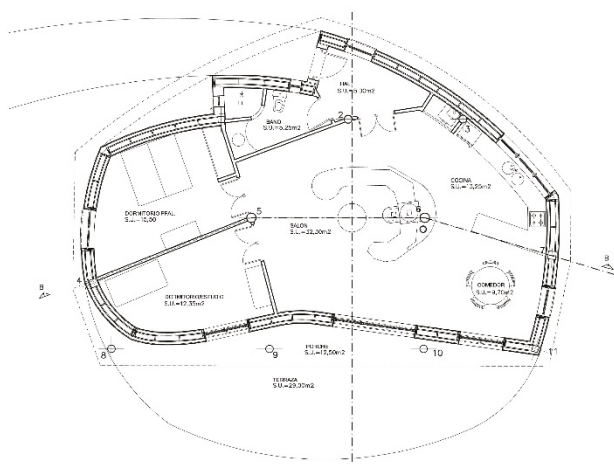


Figura 76. Fotografías y Planos de la Vivienda en Sevilla la Nueva (Alen y Calche, s.f.).

INFORMACIÓN CONSTRUCTIVA

SISTEMA PAJA UTILIZADO
SISTEMA CUT

LUZ MÁXIMA
3 M

CIMENTACIÓN
MURO DE CIMENTACIÓN EN HORMIGÓN
SOLERA ELEVADA SOBRE TERRENO 30 CM
NO HACE USO DE SOBRECIMENTOS, CAPA IMPERMEABILIZANTE EN LA BASE DE LOS MUROS.

FORJADO
FORJADO SANITARIO DE HORMIGÓN.

ESTRUCTURA
SISTEMA CUT (LISTONES DE MADERA 10CM X 3CM) EN CONJUNTO A POSTES Y VIGAS PARA CREAR EL VANO INTERIOR DEL SALÓN Y EL PORCHE EXTERIOR. ESTRUCTURA EN MADERA PARA LA CUBIERTA.

PARAMENTOS EXTERIORES
GROSOR 40CM, MORTERO DE TIERRA EN INTERIOR, RECOCO DE CAL Y TIERRA EN EL EXTERIOR, NO HAY USO DE AISLAMIENTO EXTRA.

APERTURAS
8 VENTANAS, 2 PUERTAS, 10 TOTAL. TAMAÑO MÁXIMO 2.4M X 1.4M.

CUBIERTA
CUBIERTA A DOS AGUAS AJARDINADA, CON ESTRUCTURA DE MADERA, VOLVADIZO DE 0.55M.

CLASIFICACIÓN ENERGÉTICA
CLASE A



Figura 77. Fotografías y 3D Vivienda en Sevilla la Nueva (Alen y Calche, s.f.).

3.3 SISTEMA CUT

2/3

INFORMACIÓN GENERAL

DENOMINACIÓN PROYECTO
VIVIENDA EN COMENAR DEL
ARROYO

TIPOLOGÍA
VIVIENDA UNIFAMILIAR

AÑO CONSTRUCCIÓN
2019

ARQUITECTO
ALFONSO ZAVALA

LOCALIZACIÓN
URB. VALLE DEL SOL. COLMENAR DE ARRO-
YO, MADRID

ZONA CLIMATOLÓGICA
CSC, MEDITERRÁNEO

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO
VIVIENDA DE CON UN DISEÑO SENCILLO,
CUBIERTA VEGETAL A UN AGUA. SE OPTA
POR UN DISEÑO PRÁCTICO Y SENCILLO DE
EJECUTAR. SE UTILIZA EL SISTEMA CUT EN
CONJUNTO CON UN TECHO PLANO DE
VIGAS DE MADERA VISTAS Y
TERMINACIÓN CON CUBIERTA VEGETAL.

INFORMACIÓN CONSTRUCTIVA

SISTEMA PAJA UTILIZADO
SISTEMA CUT

LUZ MÁXIMA
4 M

CIMENTACIÓN
CIMENTACIÓN DE ZAPATA CORRIDA
SOLERA ELEVADA SOBRE TERRENO 30 CM
NO HACE USO DE SOBRECIMENTOS, CAPA
IMPERMEABILIZANTE EN LA BASE DE LOS
MUROS.

FORJADO
SOLERA DE HORMIGÓN SOBREELEVADA
SOBRE CASETONES.

ESTRUCTURA
ESTRUCTURA DE MADERA LIGERA REFOR-
ZADA CON PAJA A COMPRESIÓN, SISTEMA
CUT.

PARAMENTOS EXTERIORES
GROSOR 40CM, PLACAS DE YESO EN EL IN-
TERIOR, REVOCO DE CALAÉREA
ALIGERADO EN EXTERIOR, NO HAY USO DE
AISLAMIENTO EXTRA.

APERTURAS
6 VENTANAS, 2 PUERTAS, 8 TOTAL. TAMAÑO
MÁXIMO 2.4M X 1.9M.

CUBIERTA
CUBIERTA PLANA AJARDINADA CON ES-
TRUCTURA DE MADERA, VOLVADIZO DE
0.5M.

CLASIFICACIÓN ENERGÉTICA
CLASE A



INFORMACIÓN ESPACIAL

SUPERFICIE CONSTRUIDA
78 M2 VIVIENDA

Nº DE PLANTAS
1

MORFOLOGÍA
PLANTA PERFECTAMENTE CUADRADA
CON LAS ESQUINAS REDONDEADAS.

PROGRAMA FUNCIONAL
UNA DISTRIBUCIÓN SENCILLA. SE
ACCEDE DIRECTAMENTE AL SALÓN
COMEDOR COCINA, QUE DA ACCESO
AL BAÑO Y A LAS DOS HABITACIONES
DE LA CASA. DE ESTE ADEMÁS SALE
OTRA PUERTA A LA TERRAZA.

Nº HABITACIONES
1 SALÓN COMEDOR COCINA, 1 BAÑO, 2
HABITACIONES, 1 TERRAZA

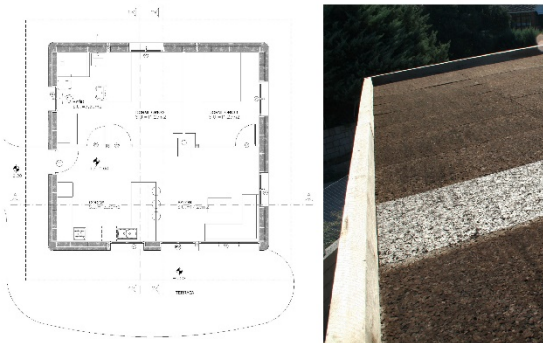
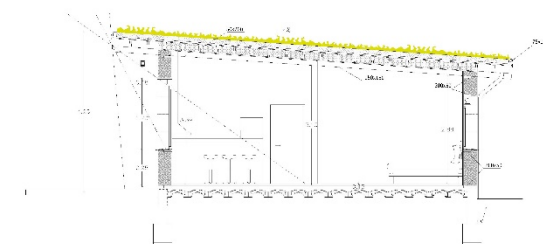


Figura 78. Fotografías y Planos de la Vivienda en Colmenar del Arroyo (Alen y Calche, s.f.).

3.3 SISTEMA CUT

3/3

INFORMACIÓN GENERAL

DENOMINACIÓN PROYECTO
VIVIENDA EN VILANOVA DEL VALLÈS

TIPOLOGÍA
VIVIENDA UNIFAMILIAR

AÑO CONSTRUCCIÓN
2020

ARQUITECTO
MIRCO ZECCHETTO

LOCALIZACIÓN
VILANOVA DEL VALLÈS, CATALUÑA

ZONA CLIMATOLÓGICA
CSA, MEDITERRÁNEO

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO
VIVIENDA CONSTRUIDA MEDIANTE EL SISTEMA CUT. TOMA PATIDO DE SU SITUACIÓN EN PENDIENTE PARA CREAR UN DISEÑO ORIENTADO A LAS MONTAÑAS, CON UN VOLUMEN RECTANGULAR Y CUBIERTA PLANA, ESTÁ ENCASTRADA EN LA LADERA.

INFORMACIÓN CONSTRUCTIVA

SISTEMA PAJA UTILIZADO
SISTEMA CUT

LUZ MÁXIMA
5 M

CIMENTACIÓN
CIMENTACIÓN DE ZAPATA CORRIDA DE HORMIGÓN
SOLERA ELEVADA SOBRE TERRENO 10 CM
SOBRECIMENTOS A BASE DE 2 HILERAS DE TERMOARCILLA REMATADOS CON UNA TELA IMPERMEABLE.
ALTURA TOTAL DE 30CM.

FORJADO
FORJADO SANITARIO DE HORMIGÓN EN PLANTA BAJA.
FORJADO DE MADERA EN PLANTA ALTA.

ESTRUCTURA
PAREDES EXTERIORES AUTOPORTANTES A BASE DEL SISTEMA CUT, SOPORTANDO LA CUBIERTA.
VIGAS Y PILARES DE MADERA EN LA ZONA CENTRAL PARA AUMENTAR EL ESPACIO INTERIOR.

PARAMENTOS EXTERIORES
GROSOR 40CM, REVOCO DE ARCILLA EN EL INTERIOR, REVOCO DE CAL EN EL EXTERIOR, NO HAY USO DE AISLAMIENTO EXTRA.

APERTURAS
12 VENTANAS, 4 PUERTAS, 8 TOTAL. TAMAÑO MÁXIMO 2.5M X 2.2M.

CUBIERTA
CUBIERTA PLANA AJARDINADA CON ESTRUCTURA DE MADERA, VOLVADIZO DE 0.8M.

CLASIFICACIÓN ENERGÉTICA
CLASE A



INFORMACIÓN ESPACIAL

SUPERFICIE CONSTRUIDA
170 M2 VIVIENDA

Nº DE PLANTAS
2

MORFOLOGÍA
PLANTA PERFECTAMENTE CUADRADA CON LAS ESQUINAS REDONDEADAS.

PROGRAMA FUNCIONAL
DATOS NO DISPONIBLES

Nº HABITACIONES
DATOS NO DISPONIBLES



Figura 79. Fotografías Vivienda Vilanova del Vallès (Zecchetto, 2021).

INFORMACIÓN GENERAL

DENOMINACIÓN PROYECTO
VIVIENDA EN ARASÁN

TIPOLOGÍA
VIVIENDA UNIFAMILIAR

AÑO CONSTRUCCIÓN
2020

ARQUITECTO
ALFONSO ZAVALA

LOCALIZACIÓN
ARASÁN, BISAURRI, ARAGÓN

ZONA CLIMATOLÓGICA
CFB, OCEÁNICO



Figura 81. Localización Vivienda en Arasán (de Autor).

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

VIVIENDA CONSTRUIDA EN UN PEQUEÑO PUEBLO DEL PIRINEO, CON DIFICULTAD EN EL EMPLAZAMIENTO DEBIDO A LA INCLINACIÓN DEL TERRENO. DIVIDIDA EN DOS PLANTAS, HACE USO DE UNA ESTRUCTURA EN MADERA Y PREFABRICADOS DE PAJA DE PEQUEÑO FORMATO BALA-BOX.

INFORMACIÓN ESPACIAL

SUPERFICIE CONSTRUIDA
145 M2 VIVIENDA + 35 M2 GARAJE. TOTAL 180 M2

Nº DE PLANTAS
2

MORFOLOGÍA

LAS DOS PLANTAS SON REGULARES CON FORMA RECTANGULAR, SIENDO LA PLANTA BAJA MÁS EXTENSA EN SUPERFICIE. DOS VOLUMENES RECTANGULARES SUPERPUESTOS, CON UN TEJADO A DOS AGUAS AÑADIDO EN LA PARTE SUPERIOR.

PROGRAMA FUNCIONAL

SALÓN-COMEDOR-COCINA INTEGRADOS EN UN GRAN ESPACIO EN PLANTA BAJA, A LOS QUE SE SUMAN UN BAÑO, UNA HABITACIÓN Y LAS ESCALERAS A LA PLANTA SUPERIOR. EN EL LADO OPUESTO ESTÁ EL PORCHE, QUE SIRVE COMO APARCAMIENTO. LA PLANTA SUPERIOR SE ORGANIZA ALREDEDOR DE UN DISTRIBUIDOR, EL CUAL PERMITE ACCEDER OTRO BAÑO Y DOS HABITACIONES. DE ESTAS HABITACIONES UNA DE ELLAS ES LA PRINCIPAL DE LA CASA Y DISPONE DE BAÑO PROPIO.

Nº HABITACIONES

1 SALÓN COMEDOR COCINA, 2 BAÑOS, 3 HABITACIONES, 1 LAVADERO, 1 PORCHE

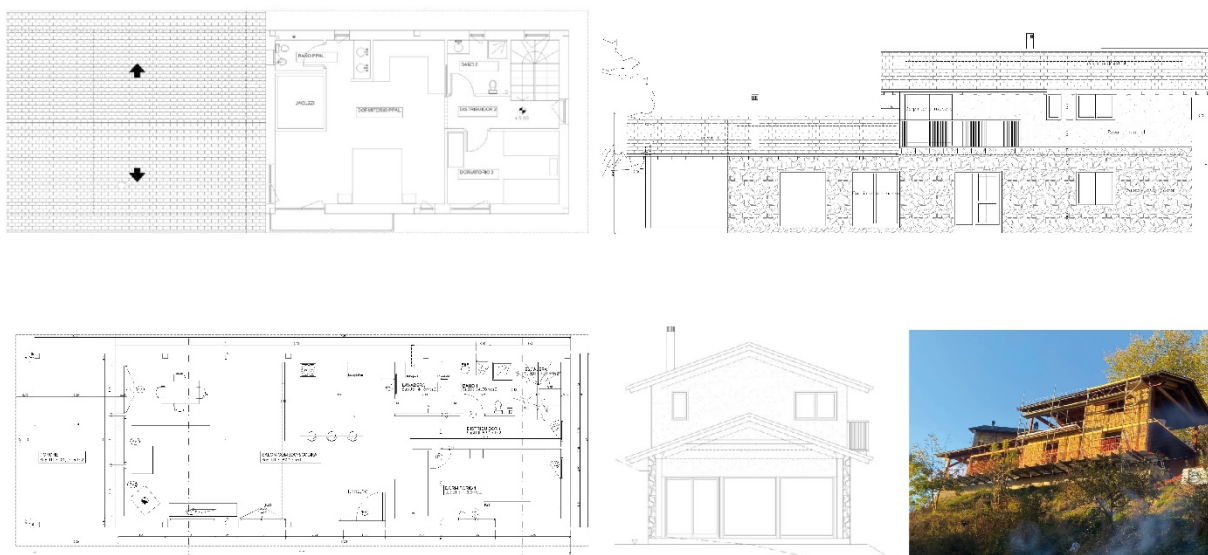


Figura 80. Plantas y Fotografías Vivienda en Arasán (Alen y Calche, s.f.).

INFORMACIÓN CONSTRUCTIVA

SISTEMA PAJA UTILIZADO
SISTEMA PREFABRICADO

LUZ MÁXIMA
6.25 M

CIMENTACIÓN
MURO DE CIMENTACIÓN EN HORMIGÓN
SOLERA ELEVADA SOBRE TERRENO 20 CM - 1 M
BLOQUE DE TERMOARCILLA 20 CM + ZUNCHO MADERA 10 CM
ELEVACIÓN TOTAL MEDIA SOBRE EL TERRENO 0.9 M

FORJADO
PLACAS ALVEOLARES DE HORMIGÓN EN PLANTA BAJA.
VIGAS METÁLICAS, VIGUETAS DE MADERA, CAPA DE COMPRESIÓN DE HORMIGÓN CON ENCOFRADO DE METAL.

ESTRUCTURA
MÓDULOS DE PAJA CON PILARES METÁLICOS Y DE MADERA.
VIGAS METÁLICAS Y DE MADERA.
ESTRUCTURA DE LA CUBIERTA EN MADERA.

PARAMENTOS EXTERIORES
GROSOR 35CM (MÁS ACABADO), REVOCO DE ARCILLA EN INTERIOR, REVOCO DE CAL Y PIEDRA DEL PAÍS EN EL EXTERIOR, NO HAY USO DE AISLAMIENTO EXTRA.

APERTURAS
16 VENTANAS, 3 PUERTAS, 19 TOTAL. TAMAÑO MÁXIMO 6M X 2.2M.

CUBIERTA
CUBIERTA A DOS AGUAS, REMATADA EN PIZARRA, VOLVADIZO DE 0.7M.

CLASIFICACIÓN ENERGÉTICA
CLASE A

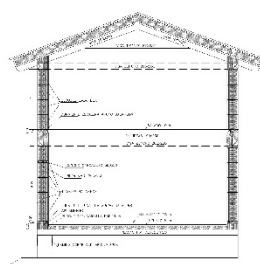
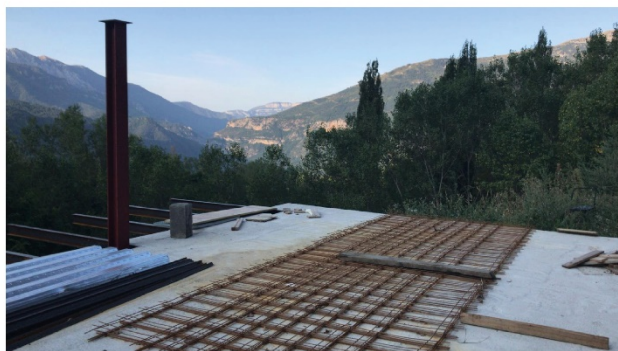


Figura 82. Sección y Fotografías Vivienda en Arasán (Alen y Calche, s.f.).

INFORMACIÓN GENERAL

DENOMINACIÓN PROYECTO
VIVIENDA EN VALDEMORILLO

TIPOLOGÍA
VIVIENDA UNIFAMILIAR

AÑO CONSTRUCCIÓN
2019

ARQUITECTO
ALFONSO ZAVALA

LOCALIZACIÓN
PUENTELASIERRA,
VALDEMORILLO, MADRID

ZONA CLIMATOLÓGICA
CSC, MEDITERRÁNEO



DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO
VIVIENDA EN PLANTA ÚNICA CON LOS DORMITORIOS AL SUR Y EL SALÓN AL NORTE CON VISTAS A LA SIERRA.
CONSTRUIDA A BASE DE PREFABRICADOS Y UN MURO DE CARGA INTERMEDIO DE LADRILLO QUE ADEMÁS APORTA INERCIA TÉRMICA.
LOS REBOCOS SON NATURALES Y POSEE UNA CUBIERTA PLANA VEGETAL.

INFORMACIÓN ESPACIAL

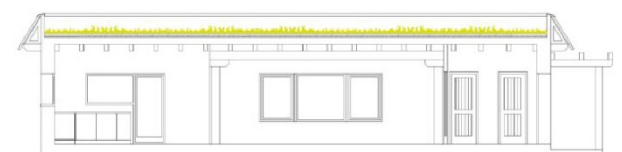
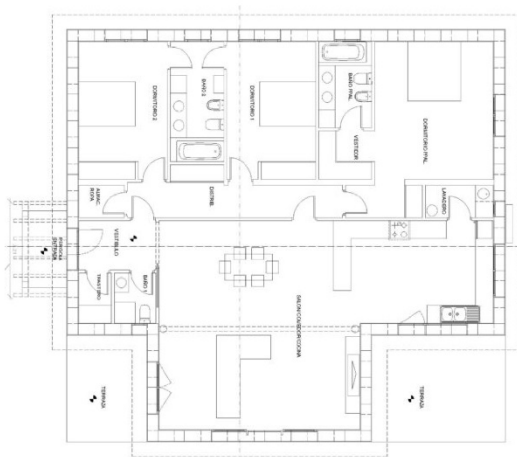
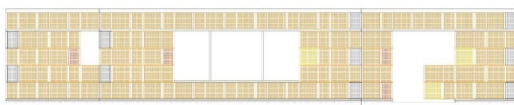
SUPERFICIE CONSTRUIDA
180 M2

Nº DE PLANTAS
1

MORFOLOGÍA
EDIFICIO DE UNA ÚNICA PLANTA, CON UNA CUBIERTA PLANA.
POSEE FORMA DE T DE POCA ALTURA CON ALERO EN LOS CUATRO LADOS.

PROGRAMA FUNCIONAL
SE ACCEDE A UN VESTÍBULO DESDE UN PEQUEÑO PORCHE EXTERIOR, DESDE DONDE SE PUEDE IR AL DISTRIBUIDOR DE LOS DORMITORIOS O AL SALÓN COMEDOR COCINA. DESDE EL SALÓN SE PUEDE SALIR A DOS TERRAZAS EXTERIORES NO CUBIERTAS.

Nº HABITACIONES
1 SALÓN COMEDOR COCINA, 3 BAÑOS, 3 HABITACIONES, 2 TERRAZAS.



SECCION BB

Figura 83. Planos y Fotografía Vivienda en Valdemorillo (Alen y Calche, s.f.).

INFORMACIÓN CONSTRUCTIVA

SISTEMA PAJA UTILIZADO
SISTEMA PREFABRICADO

LUZ MÁXIMA
5 M

CIMENTACIÓN
CIMENTACIÓN DE ZAPATA CORRIDA
SOLERA ELEVADA SOBRE TERRENO 30 CM
SOBRECIMENTOS FORMADOS POR DOS HILERAS DE LADRILLO PERFORADO CON AISLANTE ENTRE AMBOS, REMATADOS CON UNA TELA IMPERMEABLE Y CON LISTONES DE MADERA, TOTAL DE 30CM.

FORJADO
SOLERA DE HORMIGÓN SOBREELEVADA SOBRE CASETONES.

ESTRUCTURA
PREFABRICADOS DE PAJA Y UN MURO DE CARGA INTERMEDIO DE LADRILLOS MACIZOS.

PARAMENTOS EXTERIORES
GROSOR 40CM, REVOCO DE BARRO EN INTERIOR, RECOCO DE CAL EN EL EXTERIOR, NO HAY USO DE AISLAMIENTO EXTRA.

APERTURAS
10 VENTANAS, 3 PUERTAS, 13 TOTAL. TAMAÑO MÁXIMO 2.2M X 1.9M.

CUBIERTA
CUBIERTA PLANA AJARDINADA CON ESTRUCTURA DE MADERA, VOLVADIZO DE 0.5M.

CLASIFICACIÓN ENERGÉTICA
CLASE A

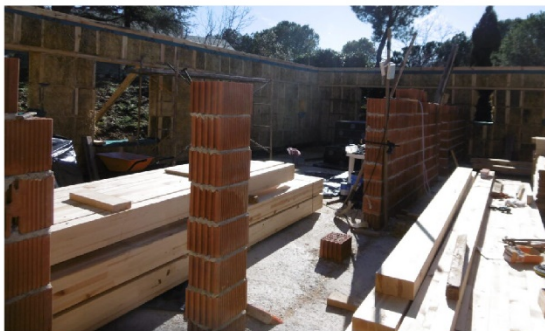


Figura 84. Fotografías Vivienda en Valdemorillo (Alen y Calche, s.f.).

INFORMACIÓN GENERAL

DENOMINACIÓN PROYECTO
VIVIENDA EN OLVAN

TIPOLOGÍA
VIVIENDA UNIFAMILIAR

AÑO CONSTRUCCIÓN
2020

ARQUITECTO
MIRCO ZECCHETTO

LOCALIZACIÓN
OLVAN, BERGADÁ, CATALUÑA

ZONA CLIMATOLÓGICA
CFB, OCEÁNICO



DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO
VIVIENDA DE DOS PLANTAS, CONSTRUIDA A BASE DE PREFABRICADOS CON CUBIERTA A DOS AGUAS.

INFORMACIÓN ESPACIAL

SUPERFICIE CONSTRUIDA
170 M2

Nº DE PLANTAS
1

MORFOLOGÍA
UN VOLUMEN CÚBICO PRINCIPAL, CON UNA DE SUS ESQUINAS VACIADA PARA PERMITIR UN PORCHE DE ENTRADA Y OTRO MÁS ANEXADO EN LA PARTE TRASERA. DOS PLANTAS IGUALES, CUADRADAS CON UNA ESQUINA VACIADA.

PROGRAMA FUNCIONAL
VIVIENDA UNIFAMILIAR EN LA CUAL SE ACCEDI A UN VESTÍBULO DISTRIBUIDOR, DESDE AHÍ SE ACCEDI A LA TERRAZA, AL SALÓN COMEDOR COCINA, AL BAÑO Y AL PASILLO DE ACCESO A LOS DORMITORIOS. LA ENTRADA EN COCHE SE HACE POR EL LADO ESTE, QUE VA AL GARAJE DEL SEMISÓTANO, EL ACCESO PEATONAL PRINCIPAL ESTÁ SITUADO AL NORTE.

Nº HABITACIONES
1 SALÓN COMEDOR COCINA, 2 BAÑOS, 2 HABITACIONES, 1 TERRAZA, 1 VESTÍBULO



Figura 85. Fotografías Vivienda en OLVÁN (Zecchetto, 2021).

INFORMACIÓN CONSTRUCTIVA

SISTEMA PAJA UTILIZADO
SISTEMA PREFABRICADO

LUZ MÁXIMA
5 M

CIMENTACIÓN
VIGAS DE CIMENTACIÓN
SOLERA ELEVADA SOBRE TERRENO 10 CM
SOBRECIMENTOS HECHOS CON UNA HILERA DOBLE DE BLOQUES DE HORMIGÓN
RELLENO DE ARLITA, REMATADO CON UNA TELA IMPERMEABLE Y CON LISTONES DE
MADERA, ALTURA TOTAL DE 25 CM

FORJADO
FORJADO SANITARIO DE HORMIGÓN.

ESTRUCTURA
PREFABRICADOS DE PAJA Y DE MADERA.

PARAMENTOS EXTERIORES
GROSOR 40CM, MORTERO DE CAL Y ARCILLA EN INTERIOR Y EXTERIOR, NO HAY USO
DE AISLAMIENTO EXTRA.

APERTURAS
10 VENTANAS, 2 PUERTAS, 12 TOTAL. TAMAÑO MÁXIMO 5.4M X 2.4M.

CUBIERTA
CUBIERTA A DOS AGUAS, CON ACABADO EN TEJA, VOLVADIZO DE 0.8M.

CLASIFICACIÓN ENERGÉTICA
CLASE A



Figura 86. Fotografías Vivienda en Olván (Zecchetto, 2021).

3.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

Este subcapítulo busca dar respuesta al primer objetivo, mediante la realización de un análisis comparativo de los casos de estudio previamente analizados.

Las realizaciones de las fichas de análisis de los subcapítulos anteriores aportan los datos necesarios sobre diversos proyectos de los principales sistemas constructivos en uso en España, permitiendo su comparativa.

Mediante esta comparativa se pretende aportar un conocimiento sobre los diferentes sistemas constructivos en paja y, además, permitir estudiar las características y datos de cada uno de ellos. El objetivo es que sirva como guía en la realización de un proyecto de arquitectura, facilitando la elección del sistema en función de las características necesarias para el proyecto.

Los campos comparativos son siempre en función del sistema constructivo, y para ello se han elegido los siguientes puntos:

Tamaños de las viviendas, tanto en número de plantas como en superficie.

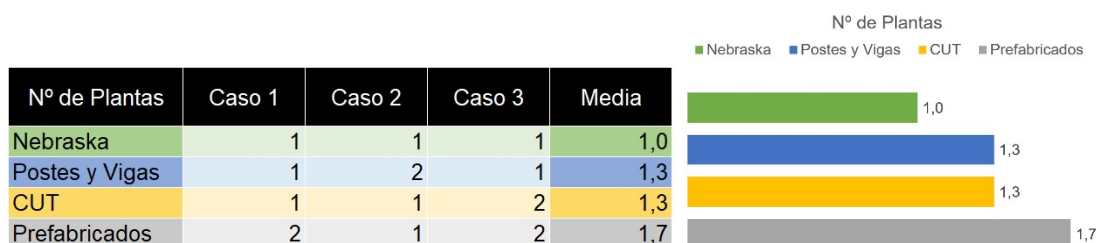
Número de aperturas y luces máximas.

Cimientos y sobrecimientos utilizados.

Grosor de muros y uso extra de aislante.

Comparativa de los sistemas según el tamaño de la vivienda:

Al respecto de esta característica existe en las fichas dos indicadores concretos que se pueden comparar, el número de plantas de las edificaciones y la cantidad de metros cuadrados de vivienda en cada uno de los proyectos.



En este primer indicador podemos ver como el sistema Nebraska, que se basa únicamente en la resistencia de la paja, es el que menor índice de alturas promedio tiene.

Este resultado está influenciado por el origen del sistema, al ser el sistema más tradicional, lo que lleva a que se base únicamente en la resistencia de los fardos comprimidos por el peso de la cubierta y forjados si los hubiera. El tener que lidiar con compresiones, aunque sean de centímetros, hace difícil construir estructuras grandes o con mucha altura. Además, suele ser usado en proyectos de autoconstrucción y por tanto estar enfocado a proyectos de menos tamaño y económicos.

El sistema CUT y el de Postes y vigas, que integran la madera en su estructura, alcanzan un índice de 1,3.

La diferencia en estos sistemas con el anterior es que gran parte de los esfuerzos a compresión son recibidos por la madera, eliminando prácticamente todo aplastamiento.

El sistema que mayor índice alcanza es el de los Prefabricados, con un índice de 1,7.

En este sistema tanto la madera como la paja funcionan a compresión, y no solo eso, sino que ambos se complementan para conseguir una mayor resistencia. Esto deriva en que con menor cantidad de madera, y por tanto de costes, se consigue una estructura igual de resistente que en los anteriores.

M2 Sup Vivienda	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Media	% Sup. sobre 200m2
Nebraska	130	45	150	108	54
Postes y Vigas	155	130	135	140	70
CUT	110	78	170	119	60
Prefabricados	180	180	170	177	88



El siguiente dato a analizar son los Metros cuadrados de superficie de las viviendas. Para que sea más claro entender los números en la gráfica se expresan los datos en %, siendo 200 m2 el 100%, esto permite ver de una forma más visual la superficie media de cada uno de ellos y su comparación.

Estos datos, al contrario que en la anterior comparativa, se observan las diferentes tendencias en tamaño de los proyectos, pero sin una correlación tan fuerte entre la resistencia de los paramentos de los diferentes sistemas y la superficie.

En este caso, los sistemas que se han usado para edificaciones de menor tamaño son el sistema CUT y el Nebraska, seguido del sistema de Postes y vigas. Es muy destacable que el sistema de Prefabricados es, y con 37 m2 de margen sobre el anterior, el que resulta en proyectos de mayor tamaño.

Comparativa de los sistemas según las Aperturas y la Luz máxima:

A la hora de realizar un proyecto es interesante siempre plantearse cuantas ventanas y puertas vamos a tener, el tamaño máximo que nos permite el sistema constructivo que vamos a utilizar y cuál es el espacio libre máximo que nos permite crear la estructura de la vivienda para organizar los espacios interiores.

Para poder entender todos esos datos, se realiza la comparativa de esos indicadores. El primero de todos es el Nº Total de Aperturas con las que cuentan los proyectos. Para hacer el cálculo de este dato se tienen en cuenta indistintamente tanto puertas como ventanas, ya que en la mayoría de ocasiones para las puertas se ha colocado algún tipo de transparencia, o en el mismo hueco existen ambas.

Nº Total Aperturas	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Media
Nebraska	12	3	16	12,0
Postes y Vigas	10	14	14	10,3
CUT	10	8	16	11,3
Prefabricados	19	13	11	14,3

En esta gráfica podemos observar que no existe demasiada disparidad entre los datos de cada uno de los sistemas, únicamente el sistema Prefabricado tiene una media algo más elevada que el resto.

Esta disparidad, y para que sirva de contexto, desaparece al tenerse en cuenta otro factor, que es el de metros cuadrados de superficie de la vivienda. Una vez que se hace la relación entre el número de aperturas y los m2 vemos que se iguala de una forma aún mayor.

Aberturas/m2 *100	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Media
Nebraska	9,2	6,7	10,7	8,9
Postes y Vigas	6,5	10,8	10,4	9,2
CUT	9,1	10,3	9,4	9,6
Prefabricados	10,6	7,2	6,5	8,1

Los datos en esta gráfica son más igualados. La diferencia esta vez es que el sistema Prefabricado en estas condiciones pasa a ser el que tiene una media

más baja, posiblemente debido a que sus ventanas sean de mayor tamaño de media (ver Tabla inferior Tamaño Máximos Aperturas), donde el sistema prefabricado tiene una media alta comparada con el resto.

Estas comparativas nos llevan a la conclusión de que en lo que respecta a cantidad, no existen diferencias significativas entre ellos.

El siguiente dato a analizar es el Tamaño Máximo de las aperturas, expresando sus valores en el área de estas. Es interesante siempre ver cuál es el mayor grado de apertura que permite en fachada cada sistema constructivo.

Tamaño Máximo Aperturas (Área m2)	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Media
Nebraska	12,96	1,6	1,6	5,4
Postes y Vigas	9,24	2,88	3,5	5,2
CUT	3,36	4,56	5,5	4,5
Prefabricados	13,2	4,18	4,4	7,3

En este caso, los datos más llamativos son el del estilo Nebraska y el de Prefabricados. En ambos el primer caso tiene un tamaño máximo de las aperturas mucho mayor que el resto, debido a que una pared entera del proyecto es vidriada. Por tanto, este dato no debe ser tenido tan en cuenta, ya que todos los sistemas permiten esta característica siempre que se adapte el proyecto para ello.

Así, los cuatro sistemas rondan entre 4 y 5 m2. Siendo el Estilo Nebraska el que dispone de las aberturas de menor tamaño.

Como conclusión a esta comparativa, se entiende que, debido a un componente estructural más sólido, los sistemas que permiten llegar a realizar las aperturas de mayor tamaño son el de postes y vigas, CUT y el de prefabricados. Por tanto, en caso de buscar un aprovechamiento solar máximo se debería optar por alguna de estas opciones.

Estas mismas conclusiones deberían ser similares y corroborarse con el siguiente indicador a estudiar, la Luz máxima. Con la luz máxima generada en cada uno de los proyectos se pretende estudiar cual permite estructuralmente crear los espacios abiertos más grandes y libres.

Este análisis no debe ser ponderado con tanta prioridad como los demás indicadores, debido a que, como en el anterior apartado, puede desvirtuarse en varios proyectos al hacer uso de estructuras de madera para aumentar el espacio interior. Aun así, sigue siendo interesante para la investigación su comparativa.

Luz Máxima	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Media
Nebraska	5,5	6,25	5	5,6
Postes y Vigas	7,4	5	7	6,5
CUT	3	4	5	4,0
Prefabricados	6,25	5	5	5,4

Aquí vemos resultados en la línea de la anterior comparativa. El sistema CUT tiene datos algo inferiores a los demás sistemas. En este caso destaca el sistema de Postes y vigas, siendo el que alcanzan una mayor luz máxima. Estos datos son debidos a que el propio sistema hace uso de vigas de madera, superando la capacidad de carga del resto de sistemas.

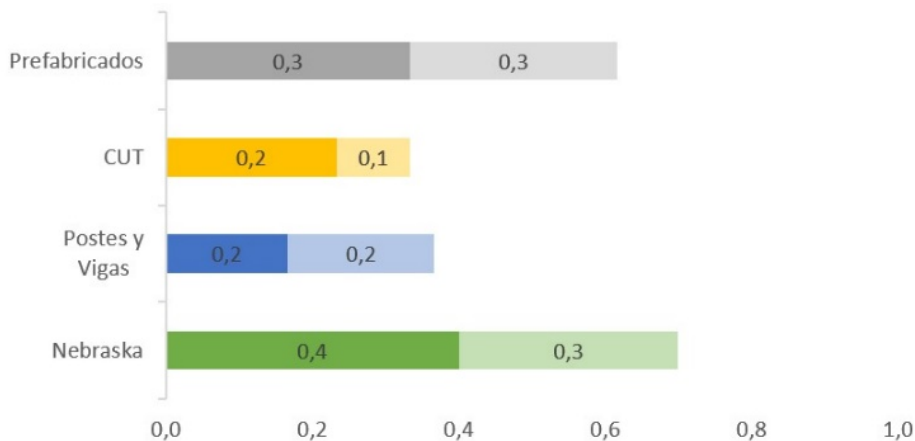
Cimientos y Sobrecimientos:

En todos los proyectos estudiados los cimientos están hechos a base de hormigón, ya sea con vigas de cimentación o mediante zapatas corridas, y los forjados inferiores están hechos también con el mismo material.

Esto se debe a que la paja debe estar muy bien protegida de la humedad, por tanto, no debe estar en contacto en ningún caso con el suelo. Para ello, en todos los proyectos la solera donde se apoyan los muros está siempre elevada con respecto al terreno. Otra medida utilizada en alguno de los proyectos es el uso de Sobrecimientos, esto es, creando una elevación sobre la solera mediante bloques de termoarcilla o similar donde descansa el muro para separarlo todavía más del nivel del suelo.

Elevación de solera	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Media
Nebraska	0,85	0,1	0,25	0,4
Postes y Vigas	0,3	0,1	0,1	0,2
CUT	0,3	0,3	0,1	0,2
Prefabricados	0,6	0,3	0,1	0,3

Elevación Sobrecimientos	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Media
Nebraska	0,3	0,3	0,3	0,3
Postes y Vigas	0	0,3	0,3	0,2
CUT	0	0	0,3	0,1
Prefabricados	0,3	0,3	0,25	0,3



En la gráfica anterior podemos ver un sumatorio de la media de elevación de la solera y los Sobrecimientos. Así, podemos comparar la elevación del arranque de los muros con respecto al suelo.

Vemos que hay disparidad entre los diferentes proyectos, destacando en todos la existencia de elevación de la solera con respecto al terreno, mientras que algunos optan por la utilización de sobrecimientos y otros no.

Grosor de Muros y Uso extra de aislante:

El indicador del grosor de los muros nos da una idea ancho necesario de los paramentos exteriores. Para estos datos, todos rondan el mismo ancho, con el estilo Nebraska siendo un poco más ancho que los demás, debido a que es el único sistema de los 4 que utiliza la paja por si sola para soportar las cargas de la cubierta y forjados a compresión.

La diferencia, un 25% más, se traduce en el aumento en 10cm de ancho. Por tanto, no existen demasiadas diferencias, aunque debe ser tenido en cuenta a la hora de plantear un proyecto.

Grosor de Muros	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Media	Uso Aislamiento Extra
Nebraska	0,5	0,45	0,45	0,5	No
Postes y Vigas	0,4	0,4	0,5	0,4	No
CUT	0,4	0,4	0,4	0,4	No
Prefabricados	0,35	0,4	0,4	0,4	No

El uso de aislamiento extra no se ha dado en ningún proyecto, con los anchos de los muros y debido a las capacidades aislantes de la paja y la madera, a veces usada combinada con la paja, es más que suficiente para que no exista ningún puente térmico y aislar de manera óptima las viviendas.

Conclusión Final del Capítulo:

Gracias a esta investigación se puede observar cómo los diferentes sistemas de construcción con paja, aún sin ser demasiado diferentes, poseen características concretas que se reflejan en cierta medida en los proyectos.

Para evitar verse condicionado en algún momento por el sistema constructivo, se debe pensar previamente cuáles son las características necesarias para lo que se pretende con el proyecto.

En este análisis se muestra que existe una tendencia del estilo Nebraska a ser utilizado en proyectos de menor tamaño. No es utilizado en ninguna edificación con doble altura o más y en superficie son los proyectos con menor extensión. Los otros tres sistemas no sufren esa limitación, teniendo todos ejemplos de 2 alturas.

Es significativo en cuanto a superficie que el sistema prefabricado destaca por encima de los demás, siendo el sistema con mayor superficie, seguido por el de postes y vigas. El sistema CUT y Nebraska se quedan atrás, seguramente debido a su naturaleza de construcción más artesanal, siendo muy parejos entre ambos.

En cuanto a las aperturas no existen grandes diferencias, salvo por los proyectos que hacen uso de alguna pared entera acristalada. Tanto en este punto como en las luces máximas los resultados pueden ser muy dispares entre proyectos, ya que algunos hacen uso de vigas o soportes de forma puntual que no corresponden al sistema constructivo.



*Figura 87. Casa de Madera, Paja y Corcho.
Magnago, Italia (LCA Architetti, 2021).*

4 DETALLES CONSTRUCTIVOS ADECUADOS AL CLIMA GALLEGO

4.1 Aspectos Físicos a Tener en Cuenta

4.1.1 Control de Temperatura

4.1.2 Humedad

4.1.3 Protección Contra el Fuego

4.1.4 Aislamiento Acústico

4.2 Detalles de la Envolvente

Este apartado pretende dar respuesta al segundo objetivo del trabajo, haciendo un análisis de cada uno de los aspectos a tener en cuenta para la realización de detalles constructivos guía de una vivienda en Galicia construida en paja.

Para esto se analizarán cada una de las cualidades físicas de la paja previamente desarrolladas en el marco teórico, junto a estudios científicos y detalles constructivos disponibles. Con el objetivo de comprender las soluciones preexistentes, recomendaciones y necesidades del material para el correcto funcionamiento de la envolvente exterior.

Con esta información se pretende, a posteriori, proponer el detalle constructivo óptimo para la construcción con paja en Galicia.

De forma previa al análisis, la primera cuestión a tratar es la decisión del sistema constructivo de paja más adecuado. Basado en el marco teórico, en el análisis de los diferentes sistemas constructivos, y las especificidades de Galicia, se concluye que es el sistema más adecuado es el de módulos prefabricados.

Esta decisión se debe a que es el sistema que mayor libertad proyectual permite, siendo el que alcanza de forma sistemática mayores aperturas. Permite de forma cómoda un mayor dimensionamiento tanto en superficie como en alturas, siendo adecuado para proyectos de todos los tamaños.

Es el sistema constructivo que mejor combina las características de la paja y la madera, para que ambos materiales trabajen de forma conjunta consiguiendo un material homogéneo fácil de trabajar. Permite una planificación previa a la construcción, implicando una mayor calidad y precisión. Esto a su vez supone otras ventajas, como el bajo coste en mano de obra, la necesidad de baja especialización, rapidez en el montaje.

Todos los sistemas estudiados resuelven satisfactoriamente los aspectos físicos de la paja como son el aislamiento térmico, masa térmica, hermeticidad, resistencia al fuego, aislamiento acústico y humedad.

Enfocándose en la adaptabilidad a Galicia debemos tener especial atención al clima, siendo este el factor diferenciador con el resto del territorio español. Existen diferencias en cuanto al nivel de aislamiento térmico que necesitamos, la importancia de la masa térmica y la cantidad de humedad.

En Galicia predomina el clima oceánico. Esto implica que tenemos temperaturas moderadas todo el año, teniendo una media de temperaturas en invierno de 8,6 °C y 19 °C en verano. En las zonas de costa las medias son ligeramente superiores a las de interior.

Las precipitaciones son abundantes durante todo el año y todo el territorio, teniendo únicamente el 2% del territorio menos de 600mm de precipitaciones anuales.

Teniendo esto en cuenta, la variación de temperaturas debe ser considerada, tanto a nivel de aislamiento, por la variación estacional, como de masa térmica del edificio, por las diferencias del ciclo día-noche. Si bien no existen temperaturas extremas podemos encontrar cifras que bajen de los 0 °C y que superen los 30 °C, y variaciones diarias de hasta 20°C.

La humedad por exposición directa es la que afrontará con más frecuencia una vivienda construida en paja. Este tipo de humedad es resultado de diferentes formas en todos los sistemas. No obstante, la humedad que más puede limitar una construcción en Galicia es la que se incorpora durante la construcción.

Para evitar este tipo de humedades es posible colocar de forma temporal un andamiaje y cobertura que proteja del agua de lluvia la obra. Esto puede llevar a aumentos de costes, fugas en la cobertura temporal, ... En los sistemas que hacen uso de fardos de paja colocados en obra, como pueden ser el sistema Nebraska o el de relleno, esta estructura temporal debería ser mantenida durante todo el proceso. Al ser métodos que requieren una colocación minuciosa los plazos pueden alargarse durante meses, ya que deberá ser mantenida hasta que los muros exteriores estén colocados.

En el caso de optarse por los paneles de prefabricados de paja y madera, la instalación de los muros exteriores puede hacerse en cuestión de una semana, permitiendo la construcción de la cobertura en un espacio de tiempo muy breve.

Por tanto, debido a su homogeneidad, simplicidad y su facilidad de ser combinado con cualquier otro tipo de técnica constructiva, se opta por escogerlo como sistema preferible para la adecuación a Galicia.

4.1 ASPECTOS FÍSICOS A TENER EN CUENTA:

4.1.1 CONTROL DE LA TEMPERATURA

La temperatura es de los aspectos más importantes a la hora de proyectar un edificio, debiendo aportar un confort térmico suficiente para que la ocupación de la vivienda sea agradable para el usuario.

Además, también juega un papel importante en el control de la humedad en el ambiente y en el impedimento de condensaciones dentro del edificio. Aunque este segundo punto será tratado en mayor profundidad en el apartado de humedad.

Aislamiento térmico:

En la mayor parte de las edificaciones los paramentos exteriores suelen hacer uso de varias capas de materiales, por ejemplo, en un muro de doble hoja de ladrillos con polietileno expandido en el centro. Esto es debido a que no todos los materiales que se pretenden usar cumplen con todos los requerimientos necesarios, por tanto, se utilizan materiales aislantes y materiales con función estructural por separado.

Para el caso de los prefabricados de paja, el material que actúa de aislante es el mismo que cumple la función estructural. Implicando que el grosor necesario de paja para formar la estructura actúa a su vez con función aislante.

La pared, por tanto, estará conformada mayoritariamente por una capa que aportando una conductividad térmica de 0.04 W/mK . Esta cifra de conductividad térmica, como ya se vio en el marco teórico, es muy próxima a la de un aislante. No necesitaremos añadir ningún otro material al muro para alcanzar las exigencias de aislamiento siempre que se respete la continuidad de la paja en el muro y la unión de esta con el aislamiento del tejado y el forjado.

En los casos de estudio del apartado anterior los grosores de los paramentos exteriores van desde los 40 cm de espesor a los 50cm en los diferentes sistemas constructivos. Las soluciones comerciales disponibles en España de Alfawall ofrece grosores de 25 cm y 35 cm + acabados y EcoCocon de 40 cm + acabados. Tenemos, por tanto, una pared que tendrá un grosor continuo de entre 25 cm y 50 cm de espesor.

Con esto, se propone una elección en el grosor de los paneles de 400 mm + los acabados, los cuales pueden venir pre revocados de fábrica o realizarse en obra y adicionar cualquier tipo de acabado encima. Esta medida garantiza el cumplimiento sobrado de la normativa española en el territorio gallego.

Esta medida es de las más comunes en los grosores de los prefabricados y garantiza que la capacidad aislante, portante y la posibilidad de apertura de vanos sin ningún tipo de restricción.

Un muro similar en características, 13mm enfoscado, 450mm paja, 13mm enfoscado, alcanza una Transmitancia Térmica de $U = 0.13 \text{ W/m}^2\text{K}$. Estos datos permiten superar por 3 veces las exigencias de Zona climática C y D que se imponen en Galicia.

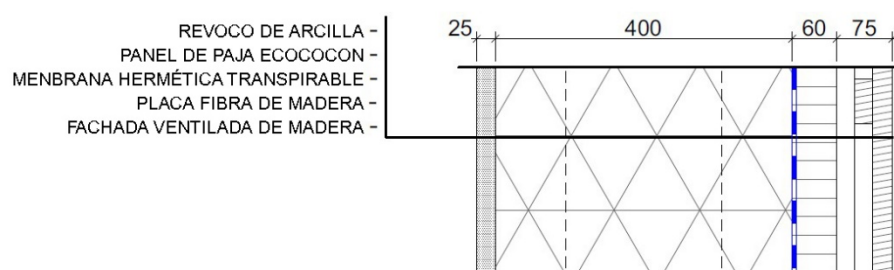


Figura 88. Sección de muro EcoCocon (EcoCocon, 2021).



Figura 89. Sección Muro Alfawall (Bala-Box, 2021).

Ambos sistemas de prefabricados utilizan grosores similares, todos cumplirían de forma holgada las exigencias de aislamiento. EcoCocon ofrece paneles con un grosor de 400 mm que alcanzan una transmitancia $U = 0.12 \text{ W/m}^2\text{K}$ adicionando 60mm de fibra de madera en el exterior. Alfawall ofrece paneles en grosores de 350 mm y 250 mm, consiguiendo una transmitancia $U = 0.166 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $U = 0.198 \text{ W/m}^2\text{K}$ respectivamente.

Almacenamiento de calor:

Para evitar fluctuaciones grandes de temperatura en la edificación necesitamos escoger materiales que tengan una capacidad térmica suficiente, esto nos permitirá mantener unas condiciones de confort térmico superiores sin necesidad de hacer uso de sistemas de climatización.

La capacidad calórica específica de la paja es mucho más baja que otros materiales constructivos como pueden ser los ladrillos o el hormigón. Basándonos en las investigaciones y libros que hablan al respecto de ello podemos definir las características optimas de los revocos interiores, que ayudarán a suplir la falta de masa térmica de la paja.

En este sentido el libro de *Construcción con paja* (Minke & Mahlke, 2006) recomienda el uso de barro para los revocos, así como particiones interiores de ladrillo macizo para suplir esta falta. *The Green Building Bible* va más allá y analiza la efectividad de los grosores para materiales densos, obteniendo que el 50% de la energía recuperada provienen de los primeros 25mm y el 90% de 50mm. Por tanto, se llega a la conclusión de que algo mayor a 50mm no aportaría demasiado, siendo este grosor el imprescindible para cumplir la función reguladora de temperatura.

Empíricamente estos datos también se corroboran con el estudio analizado de Carol Arkinson (ver figura 54), donde se mantenía la temperatura estable con revocos de arcilla de un espesor de 25mm. La diferencia de temperatura del ciclo día-noche analizada es de 20°C (27 °C día, 7 °C noche), similar a las diferencias máximas que se dan en Galicia.

En cuanto a los proyectos analizados, todos optan por revocos de cal o de tierra a excepción de la vivienda en Colmenar del Arroyo. La edificación hace uso de placas de yeso debido a que su construcción fue autoconstrucción y debía ser lo más simple posible.

En los detalles de EcoCocon (Figura 63 y 65) y los de Alfawall (Figura 64), se ve como ambos mantienen siempre el revoco interior en los montajes recomendados. Se presenta como opción diferenciada la alternativa de fachadas ventiladas, que únicamente prescinden de los revocos en el exterior. Todos los detalles comerciales disponibles presentan revocos interiores, corroborando esta necesidad de masa térmica en el interior de la zona aislada.

Por las diferentes recomendaciones de libros, estudios, la información extraída de los casos de estudio y los diversos detalles constructivos se entiende que lo más adecuado para el acabado interior es el revoco a base de tierra o cal, con un espesor de 50mm. Estas características garantizarán que el edificio esté provisto de una masa térmica suficiente para que la temperatura se mantenga estable a lo largo del ciclo día-noche.

Adicionalmente los tabiques interiores deberán pretender el mismo objetivo, dotar al edificio de la mayor masa térmica posible, siendo adecuado, aunque no imprescindible, el uso de ladrillos macizos.

Con esto garantizaremos que la vivienda construida en Galicia sea capaz de mantener una temperatura constante en el ciclo día-noche, consiguiendo también una temperatura estable entre diferentes días contiguos sin necesidad de aporte energético constante.

Hermeticidad:

Este punto tiene repercusión tanto en el control de la temperatura del edificio como en el control de la humedad. Una pérdida de estanquidad implicará un intercambio del aire exterior e interior, y si esto ocurriera con una diferencia de temperatura muy grande podría ocasionar la aparición de humedades indeseadas debido a la condensación.

Esto es importante sea cual sea el lugar de construcción, ya que el aire interior siempre tendrá una alta concentración de humedad. La diferencia de temperatura que provoque condensaciones puede venir dada por una menor temperatura exterior, debida al clima, o el uso de aire acondicionado.

En el caso de Galicia, dado que las temperaturas superiores a 30 °C, son puntuales, no suele usarse aire acondicionado en el interior de las viviendas. Las condensaciones suelen venir dadas por infiltraciones de aire frío del exterior y provocadas por la humedad interior.

Debido a que el estudio *Air Tightness of Straw Bale Construction* (Brojan, Weil, & Clouston, 2015), demuestra que la paja compactada por sí sola no tiene prácticamente ninguna capacidad de crear un ambiente estanco, es especialmente importante tenerlo en cuenta en este apartado.

Con la intención de mantener esta hermeticidad pueden usarse los revocos de cal y de tierra, son opciones tradicionales que funcionan bien y además son las escogidas en la mayoría de los proyectos analizados. Para ello normalmente se opta por el uso de revoco de tierra en el interior, debido a que son los más sanos y naturales, y revocos de cal en el exterior, los cuales ayudarán a controlar la humedad.

Como alternativas tenemos la empresa EcoCocon, la cual en el exterior sus paneles prefabricados usan una membrana hermética, un panel de conglomerado de madera a lo que adiciona o 5mm de revoco permeable al vapor o un acabado de fachada ventilada de cualquier tipo. En este caso la capa hermética que crearía la cal es sustituida por una membrana. La capa extra de conglomerado de madera es únicamente para alcanzar mayor grado aislante.

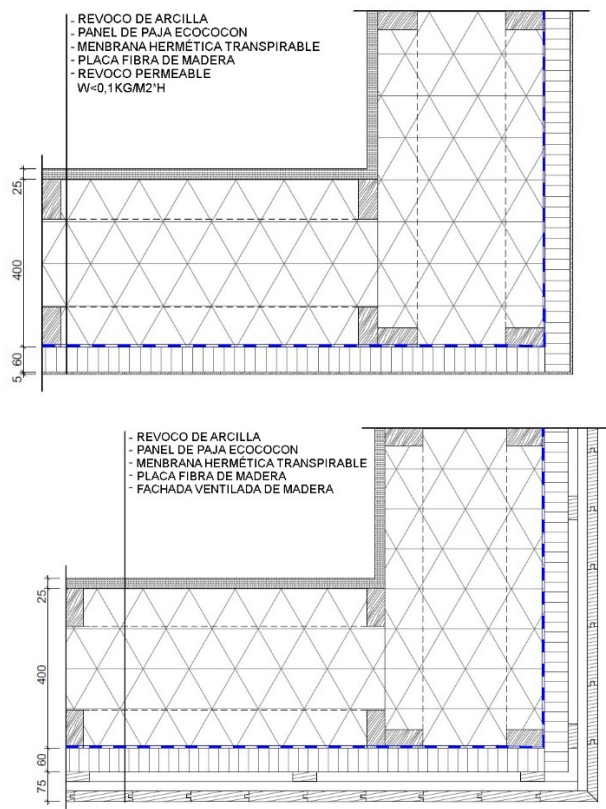


Figura 90. Detalle Constructivo Muro Exterior EcoCocon (EcoCocon, 2021).

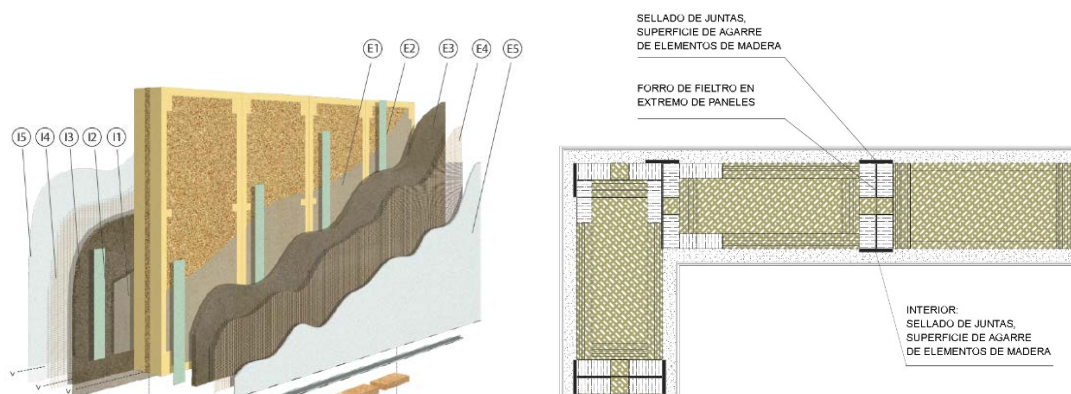


Figura 91. Detalle Composición Muro Alfawall (Okambuva.coop, 2021).

Figura 92. Detalle Muro con Junta Sellado Alfawall (Okambuva.coop, 2021).

El sistema Alfawall tiene un detalle similar, siendo el material E1/I1 una imprimación de arcilla en ambas caras y el E2/I2 un sellado de juntas de los elementos de madera. Por encima de esto E3 una capa de mortero de cal y el I3 una capa de mortero de arcilla.



Figura 93. Diferentes Soluciones al Revoco del Sistema de Postes y Vigas (Magwood, Mack, & Therrien, *More Straw Bale Building: A Complete Guide to Designing and Building with Straw*, 2005, pág. 138).

En sistemas diferentes a los prefabricados también puede observarse el mismo cuidado especial con la hermeticidad. Los detalles superiores son soluciones al sistema de postes y vigas, concretamente de los puntos donde existe el cambio de material de paja y madera, y por tanto podrían generarse fisuras en el revoco. La solución que debe tomarse, aconsejado por el libro *More Straw Building* (Magwood, Mack, & Therrien, 2005), es el uso de una malla de refuerzo en el revoco para evitar las fisuras y la pérdida de hermeticidad.

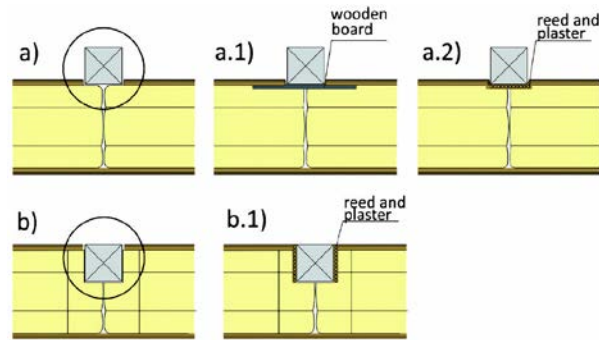


Figura 94. Posibles Soluciones para Mejorar la Hermeticidad de un Muro de Paja (Brojan, Weil, & Clouston, 2015).

Otra solución aportada por el estudio de hermeticidad *Air Tightness of Straw Bale Construction* (Brojan, Weil, & Clouston, 2015), es la extensión del revoco en los laterales de la madera, o adicionar revoco o una plancha de madera en la parte trasera.

Con todo esto se muestra la necesidad de prestar gran atención al detalle para impedir que haya problemas con la hermeticidad en los muros. La solución más práctica y que puede conllevar a menor error en obra es una aplicación similar al sistema Alfawall, con el uso de una membrana para el sellado de las juntas de todos los módulos tanto en el exterior como en el interior, así como una aplicación de revoco por encima.

4.1.2 HUMEDAD

En el marco teórico se identificaron 5 tipos de humedad que afectan a la paja. Humedad por exposición directa, humedad por capilaridad, humedad por condensación, humedad accidental y humedad incorporada durante la construcción.

Cada uno de estos puntos deben ser solventados para que el edificio funcione de forma óptima y, especialmente en este tipo de construcciones, que la durabilidad del edificio sea alargada.

La primera y más importante, la **humedad por exposición directa** es causada por la lluvia. Es la humedad que puede penetrar en mayor cantidad y con mayor frecuencia en los muros. Las precipitaciones en Galicia superan los 600mm al año en la práctica totalidad del territorio, con una media de 1180mm. Esto lo convierte en un territorio con una cantidad de lluvias moderada, y por eso debemos prestar especial atención a este punto.

Lo primero de todo será un buen alero, todos los proyectos analizados hacen uso del alero en toda la edificación, con medidas que van entre los 0,5 m a los 1,2 m, siendo lo más normal 0,8m. Esta práctica además es recomendada en todos los libros sobre construcción con paja como *Casa de Paja*, *Manual de Construcción con Fardos de Paja*, *More Straw Bale Building*, etc.

En este último se aconseja plantearlo de al menos 24 pulgadas (61cm) de longitud, e incluso el plantearse en el diseño un porche en la dirección de los vientos predominantes para lugares con mucha lluvia.

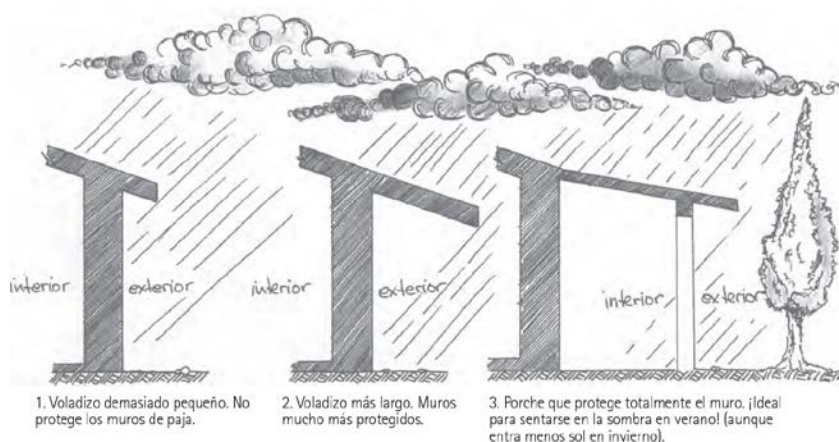


Figura 95. Ilustración del Diseño de Aleros (Nitzkin & Termens, *Casas de paja*, Una guía para autoconstructores, 2010).

Por supuesto cuanto mayor longitud siempre será mejor, pero siendo el mínimo 61cm y siendo la distancia más común 80cm en los proyectos estudiados esta medida parece la más razonable.

Otro punto a tener en cuenta con el agua de lluvia, una vez que el muro está protegido en su parte alta hay que fijarse en la parte baja. Surge el problema de las salpicaduras de agua contra el suelo, para lo que será de ayuda la medida de crear un alero de dimensiones generosas, alejando el agua de todo el muro.

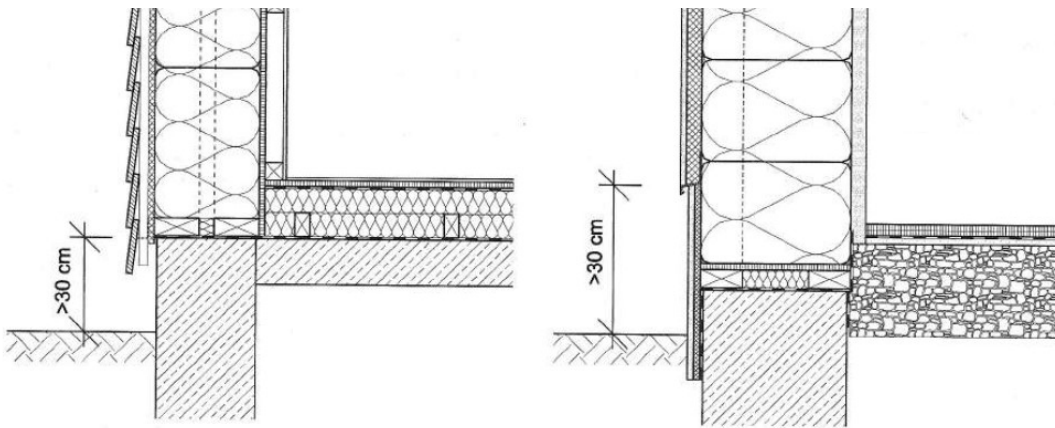


Figura 96. Muro de Fardos Sobre Zona de Salpicadura (Minke & Mahlke, 2006, pág. 30).

La siguiente estrategia a seguir es la separación de la paja del suelo, con la intención de evitar cualquier humedad en la pared. Esto se puede hacer elevando el muro un mínimo de 30cm (Minke & Mahlke, 2006) o mediante una barrera antihumedad en la parte baja del muro (Steen, Bill, & Bainbridge, 1994). Este tipo de medidas es observable también en todos los casos de estudio, donde la solera está siempre elevada del terreno y en prácticamente todos se da el uso de sobrecimientos.

La siguiente medida a tomar será la reducción de las salpicaduras del suelo, limitadas en gran parte por el alero, se mitigan mediante superficies blandas como la tierra o la grava.

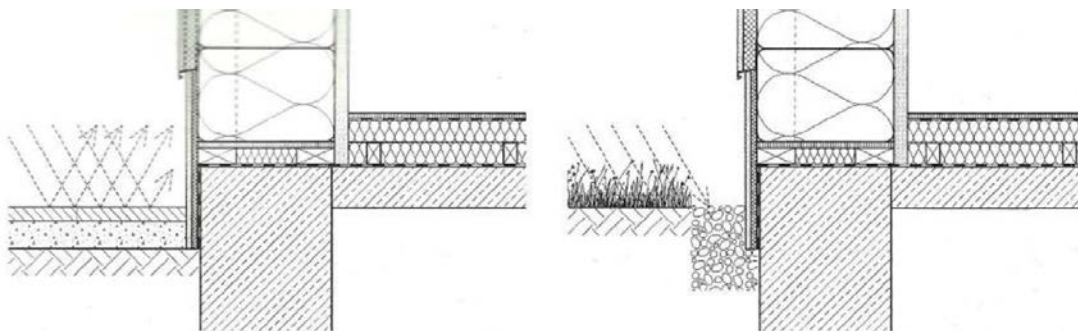


Figura 97. Reducción de Salpicaduras (Minke & Mahlke, 2006, pág. 31).

Humedad por capilaridad, realmente sencillas de solventar, ya sea mediante la impermeabilización de la cimentación o mediante la colocación de una lámina impermeabilizante entre el muro y su base. Esto debe ser siempre tenido en cuenta independientemente de la localización del edificio y el sistema constructivo utilizado.

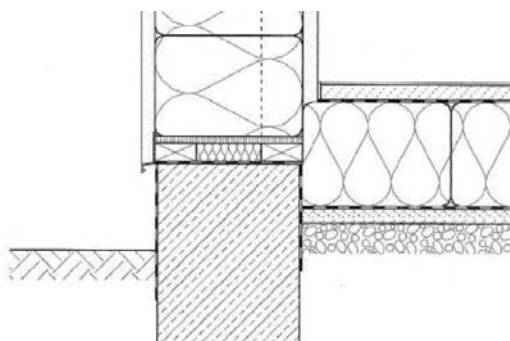


Figura 98. Impermeabilización de la Base del Muro (Minke & Mahlke, 2006, pág. 46).

Figura 99. Cimentación y Estructura de Madera Vivienda Batres (Alen y Calche, 2021).

Humedad por Condensación. Las causas son iguales al resto de sistemas constructivos, una saturación de humedad en el aire que se encuentra con materiales o aire a temperaturas más frías. En este caso las consecuencias pueden ser graves, ya que la aparición de humedades es más perjudicial en la paja que en otros materiales al poder provocar pudrición.

Debido a las bajas temperaturas en invierno y a la alta concentración de humedad en el aire, fomenta que se generen este tipo de humedades en Galicia.

La solución pasa por mantener un aislamiento continuo y un mantenimiento de la hermeticidad. Siguiendo estas dos normas no deberían existir puentes térmicos, ya que no se usa ningún material conductor y el aislante debe ser continuo con los prefabricados. Como medida adicional, se debe usar una barrera de vapor en la cubierta.

CONSTRUCCIÓN PREFABRICADA EN PAJA EN ESPAÑA - 4 DETALLES CONSTRUCTIVOS ADECUADOS AL CLIMA GALLEGO

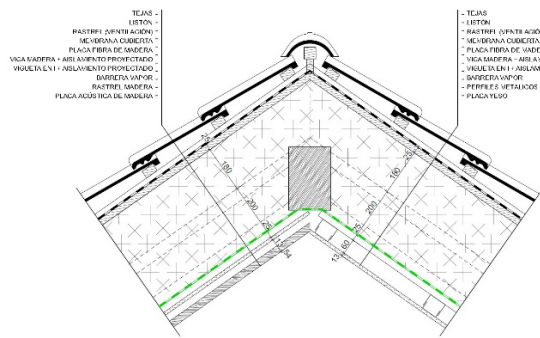


Figura 100. Detalle Cumbre (EcoCocon, 2021).

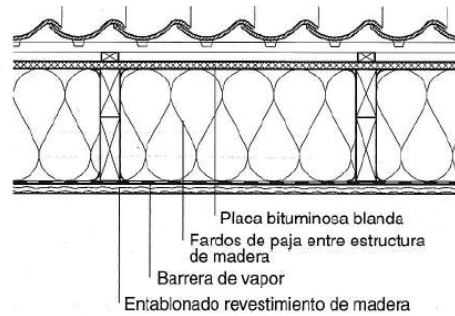


Figura 101. Techo con Fardos de Paja Entre la Estructura (Minke & Mahlke, 2006, pág. 24).

Humedad accidental. En este punto si se observa un cuidado especial en la mayor parte de proyectos estudiados, ya que la mayoría hacen uso de sobrecimientos de alrededor de 30cm.

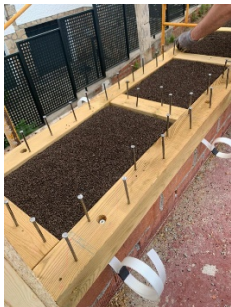


Figura 102. Detalle Cumbre (Alen y Calche, 2021).



Figura 103. Detalle Cumbre (Alen y Calche, 2021).



Figura 104. Detalle Cumbre (Zecchetto, 2021).



Figura 105. Detalle Cumbre (Zecchetto, 2021).

Humedad incorporada durante la construcción. Referente a este tipo de humedades, al ser en Galicia, las causas que más podrían afectar la obra sería la exposición al agua de lluvia, durante la construcción, y la absorción de humedad de la paja, al ser almacenada temporalmente en el lugar de construcción.

Al utilizar prefabricados, el proceso de montaje en obra se lleva a cabo únicamente cuando los cimientos y sobrecimientos ya están ejecutados. Los paneles llegan listos para su montaje, el cual puede ser realizado en un tiempo

menor a una semana, a lo que únicamente habría que añadir la estructura de la cubierta.

Esta ventaja en cuanto a ahorro de tiempo en el montaje implica que será mucho más fácil evitar este tipo de humedades en la paja. Se recorta el tiempo de exposición de la paja a la lluvia y el tiempo de almacenaje del material se reduce al máximo.

El siguiente foco de humedades en obra es el mencionado en el libro *Casas de Paja* (Nitzkin & Termens, 2010), donde se nos dice que debemos tener cuidado a la hora de aplicar materiales con gran contenido de agua como los revocos, debiendo ser en capas que permitan un correcto secado.

Esto es común a todos los sistemas construidos en paja, independientemente de su localización y por tanto las recomendaciones son las mismas.

La utilización de revocos de cal o tierra son preferibles sobre otros como el cemento, debido a que ofrecen un mayor grado de transpirabilidad. Con esto conseguimos que en el caso de aportar un exceso de humedad a la paja pueda secarse. A esto hay que añadirle un especial cuidado en no cubrir los revocos con materiales impermeables, que eviten el secado de revocos.



Figura 106. Construcciones con Paneles Prefabricados (EcoCocon, 2021).

4.1.3 PROTECCIÓN CONTRA EL FUEGO

El estudio sobre las cualidades físicas de la paja una vez se compacta y utiliza en la construcción de muros muestra, a través de diversos ensayos, como es un material que tiene un buen comportamiento contra el fuego.

El mayor riesgo que existe en este tipo de edificaciones es en el momento de la obra, cuando se puede desprender paja suelta. Es en ese momento el único de toda la obra donde podría arder el material, ya que al no estar compactada el fuego puede hacer uso del aire en el ambiente. A la hora de utilizar prefabricados en una edificación este foco de material inflamable se elimina por completo.

Los muros de paja, por tanto, no son auto combustibles. Al entrar en contacto con el fuego la parte exterior de un muro se carboniza, ralentizando la combustión del interior.

A pesar de la dificultad de combustión, es recomendable el recubrimiento en ambas caras de este tipo de muros. Se aumenta de esta forma de manera exponencial la resistencia al fuego. Un muro sin revoco es capaz de resistir una media hora de exposición directa al fuego a altas temperaturas (Steen, Bill, & Bainbridge, 1994), mientras que un muro revocado en cal o en tierra puede soportarlas durante 4 horas (Ashour & Wu).

Con los estudios disponibles, partiendo de que se va a aplicar una capa de 5cm de revoco en ambas caras, es posible superar holgadamente la legislación española y gallega en cuanto a resistencia al fuego.

El requerimiento mínimo en Estados Unidos y Canadá de revoco en ambas caras es de media pulgada de yeso (1,27cm), coincidiendo con la normativa alemana DIN 4102, que exige el revoco de los muros de paja para cumplirla.

Los materiales más recomendables para ello son revocos de cal, arcilla, cemento o una mezcla de estos, ya que debido a sus cualidades son capaces de resistir por tiempo prolongado la exposición al fuego. Este revoco además ayudará a mejorar muchas otras características del muro.

En cuanto a soluciones comerciales los paneles Alfawall hacen uso de imprimación de arcilla sobre la paja en sus módulos independientemente de cuál sea su acabado final y de si son las caras interiores o exteriores.

Si se pretende rematar la pared con mortero o es una pared interior se le adiciona una capa de cuerpo, la cual se aplica sobre todo el conjunto de forma continua, incluso por encima de la madera. El remate final es llevado a cabo mediante una capa de mortero fino.

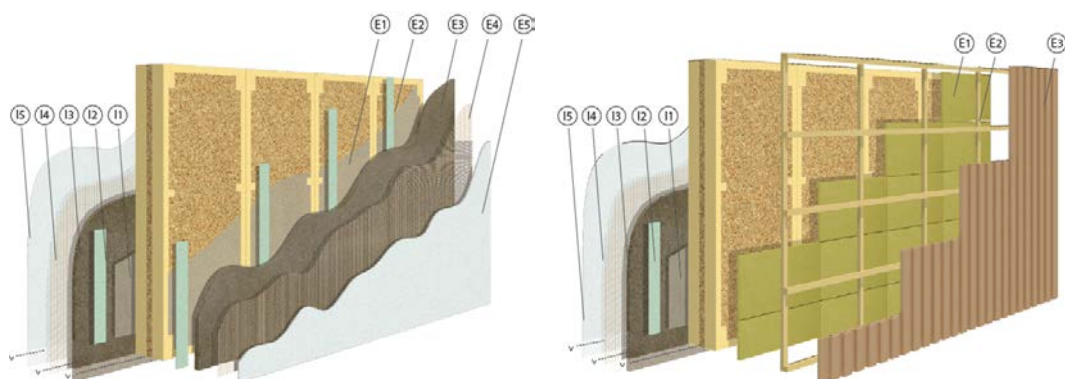


Figura 107. Composición Fachada Revestida Mortero Alfawall (Okambuva.coop, 2021).

E1 - I1: Imprimación de Arcilla.

E3 - I3: Capa de cuerpo, mortero de arcilla estabilizado con cal (NHL) o mortero de Cal (CL) aligerado.

E5 - I5: Acabado con mortero fino de cal o mortero de silicato y/o pinturas al silicato.

Figura 108. Composición Fachada Ventilada Alfawall (Okambuva.coop, 2021).

E1 - I1: Imprimación de Arcilla.

I3: Capa de cuerpo, mortero de arcilla estabilizado con cal (NHL) o mortero de Cal (CL) aligerado.

I5: Acabado con mortero fino de cal o mortero de silicato y/o pinturas al silicato.

E3: Entablado de madera.

La empresa EcoCocon toma una aproximación similar, utilizando siempre una capa continua de arcilla en el interior de las paredes exteriores realizadas con sus módulos. Sin embargo, en el exterior opta por el uso de paneles de fibra de madera, sea cual sea el acabado final, en los cuales se adiciona un revoco, una fachada ventilada en madera o cualquier otro tipo de acabado.

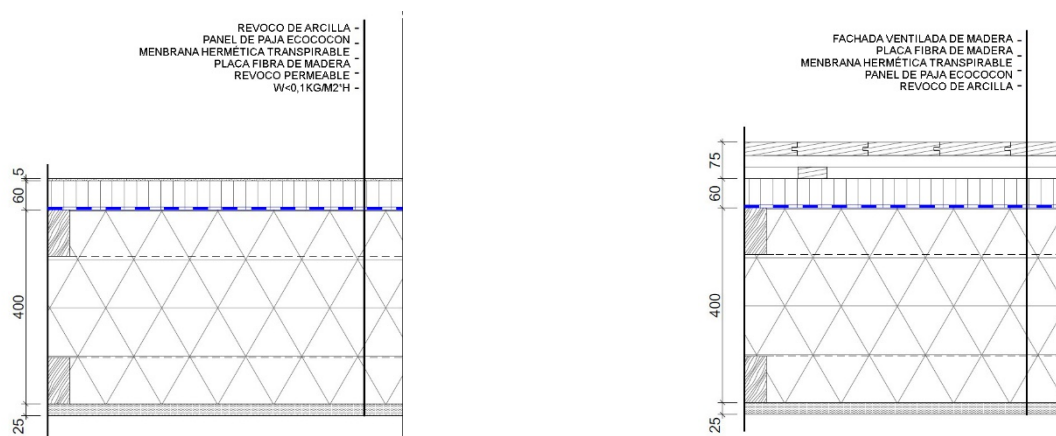


Figura 109. Detalle Constructivo Muro Exterior EcoCocon (EcoCocon, 2021).

4.1.4 AISLAMIENTO ACÚSTICO

Debido a que para el aislamiento acústico funcionan mejor los materiales con una mayor densidad, es recomendable el uso de revocos densos en ambas caras del muro. Estos ayudarán en gran medida a reducir la cantidad de ruido que es capaz de penetrar al interior de la vivienda.

En el estudio de Australia (Minke & Mahlke, 2006) analizado anteriormente en el marco teórico se destaca como 45cm de paja comprimida es suficiente para cumplir las exigencias de la normativa española, a lo cual le estaríamos adicionando a ambos lados una capa con mayor capacidad aislante de revoco.

4.2 DETALLES DE LA ENVOLVENTE

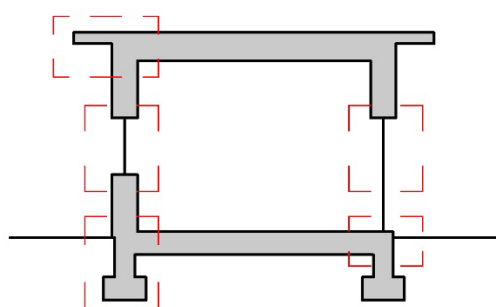
Tras el análisis del apartado anterior, se utiliza toda la información presentada para proponer detalles constructivos que buscan funcionar como guías orientativas a la hora de diseñar una vivienda con módulos prefabricados de paja.

Para ello se muestran 4 tipos diferentes de detalles de la envolvente exterior del edificio. La unión de los paramentos exteriores con la cimentación, los detalles del paramento con la cubierta y el alero, las ventanas y las puertas.

Estos puntos son los que se representan ya que son las partes más propensas a generar cualquier tipo de problema, ya sean por infiltraciones de humedad o de cualquier otro tipo.

No se ha optado por realizar el detalle de cumbrera de la cubierta debido a que no hay ninguna casa comercial ni proyecto analizado que realice ese tipo de encuentros con módulos prefabricados, siendo la estructura de estos proyectos normalmente realizados en madera.

Por tanto, se analizan los puntos críticos de los paramentos exteriores que podrían crear algún tipo de daño al edificio.



E: 1/200

Figura 110. Esquema Localización de los Detalles Constructivos (Autor).

Encuentro de Cimentación y Sobrecimientos con Muro

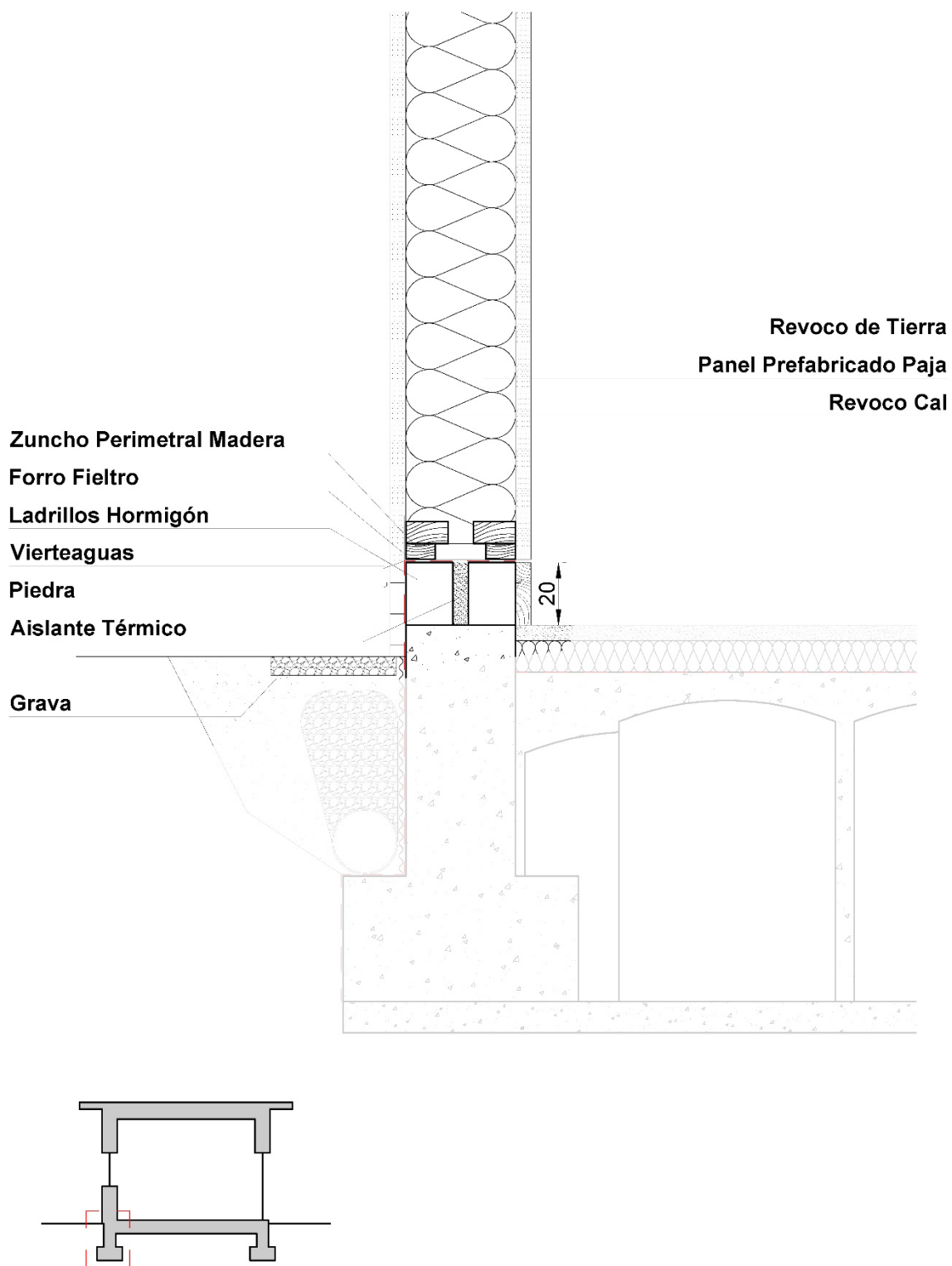


Figura 111. Detalle Unión Paramento Exterior con Cimentación (Autor).

Podemos observar cómo en la cimentación se tiene un especial cuidado con la humedad, mediante una solera con ventilación, el drenaje e impermeabilización en la cara exterior de la cimentación.

En cuanto a la solera, se coloca en la parte superior una barrera de vapor, para evitar cualquier humedad que pueda ascender de la cámara ventilada creada por los caviti. También se añade aislamiento térmico para evitar una pérdida de calor en esa parte, y sobre ello el pavimento acabado que puede ser de cualquier tipo.

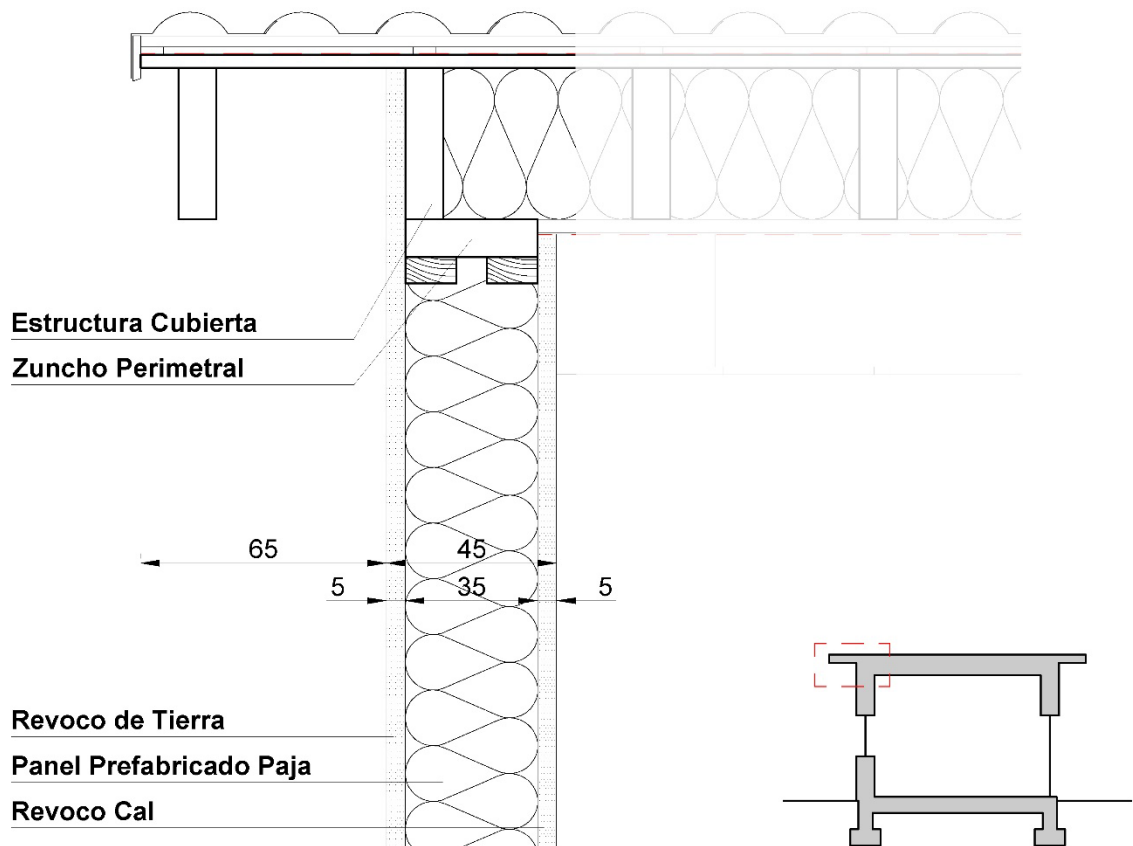
Se crea un espacio de grava en el terreno perimetral al muro exterior, con el fin de evitar las humedades por salpicadura. Se eleva el inicio del revoco exterior, al menos unos 30cm, para evitar que pueda absorber humedad del suelo o mojarse.

Todo el muro descansa sobre un sobrecimiento formado por bloques de hormigón con aislante entre las dos hileras de bloques. Tiene el objetivo de evitar la humedad accidental interior y también para asegurarnos que la paja está alejada de la humedad del suelo evitando la humedad por capilaridad.

Sobre los sobrecimientos se coloca una capa de fieltro antihumedad y un zuncho perimetral de madera donde se apoyan los prefabricados.

En cuanto al muro está completamente formado de prefabricados, revocado en tierra y cal. Este último acabado, especialmente en el exterior, podría variar, existiendo variantes con playas de yeso en el interior y fachada ventilada en el exterior, pero como se detalla en la imagen anterior sería la forma más simple y efectiva para el diseño.

Encuentro de Muro con Cubierta



E: 1/20

Figura 112. Detalle Unión Paramento Exterior con Cubierta (Autor).

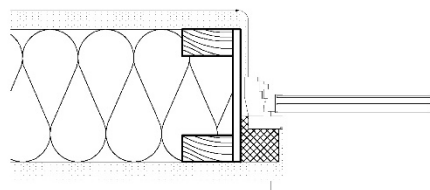
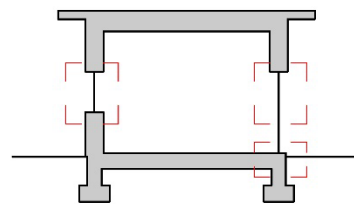
Es muy importante que el aislamiento sea continuo del muro a la cubierta, para evitar condensaciones. Es por esto que el aislamiento de la cubierta continúa hasta la parte superior del muro.

Para mantener la estanqueidad del edificio el revoco exterior continua por encima de la cubierta hasta alcanzar la parte baja del alero. De esta manera se garantiza que no existan infiltraciones de aire frío que puedan causar condensaciones.

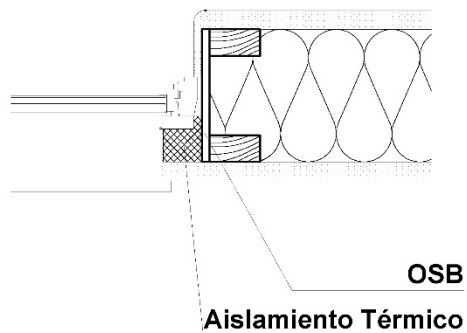
En el interior el revoco es continuo hasta llegar a la cubierta. Antes de la cubierta se ha instalado un falso techo que llega hasta el revoco interior, evitando el ascenso del aire caliente y húmedo del interior.

Puertas y Ventanas

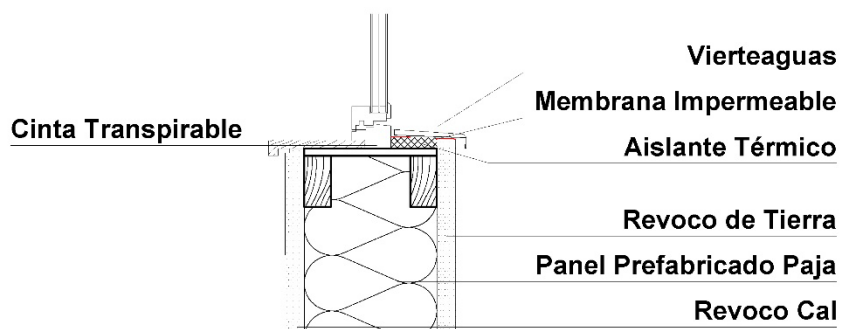
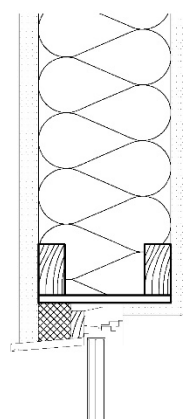
Interior



Exterior



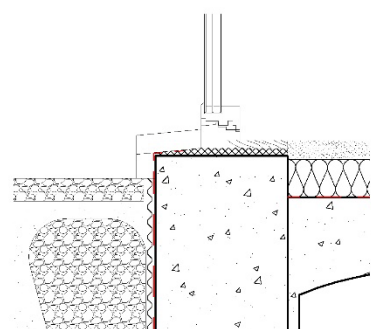
DETALLE VENTANA



Interior

Exterior

DETALLE VENTANA



Exterior

Interior

DETALLE PUERTA EXTERIOR

E: 1/20

Figura 113. Detalle Puerta y Ventana (Autor).

En cuanto a las ventanas es muy importante el cuidado especial con las humedades ya que es el punto más vulnerable en toda la edificación.

Para evitar filtraciones de agua las ventanas deben ir siempre acompañadas de dintel y vierteaguas. El revoco exterior e interior deben llegar hasta el marco de la ventana para mantener la impermeabilidad.

Deben evitarse los puentes térmicos que puedan crear condensación, para esto se utiliza aislamiento adicional entre el soporte de la ventana y el acabado exterior del muro. Utilización de ventanas con rotura de puente térmico en sus perfiles y utilización de doble cristal.

Para el caso de la puerta es similar. Un dintel en la parte superior para alejar el agua que se escurra por la pared. En la parte inferior se opta por la creación de pendiente con la misma piedra del acabado de la fachada con el mismo fin.

El aislamiento se coloca de igual forma, cubriendo el marco cuando es posible. En el caso de que se opte por puertas de cristal deben seguirse las mismas precauciones, con rotura de puente térmico para los perfiles y doble cristal.

Figura 114. Edificación en paja más grande de UK, Bioscience Nottingham University (Fulcher, 2011).



5 SISTEMATIZACIÓN DE DATOS Y CONSIDERACIONES FINALES

Tras realizar el trabajo de investigación al respecto de la construcción en paja, en sus diferentes ámbitos, con el fin de entender cómo afecta el sistema constructivo a la arquitectura se pueden llegar a una visión global positiva.

La construcción con paja actualmente tiene innumerables variantes que le permiten adaptarse a las diferentes necesidades de cada proyecto. Esta característica es el factor principal que permite que este material pueda ser utilizado en cualquier parte del mundo, concretamente en Galicia, consiguiendo una edificación óptima para los usuarios.

La investigación sobre la paja como material constructivo revela una serie de ventajas en las cualidades físicas que repercuten de forma positiva en la calidad arquitectónica, así como beneficios medioambientales que extienden su alcance positivo a muchos otros ámbitos de la sociedad.

Como contribución al conocimiento científico, se presenta la resolución a los dos objetivos de investigación.

Un catálogo de proyectos realizados en España y las diferentes técnicas constructivas con paja, analizando y comparando las características de cada uno de ellos para el estudio de su adecuación a las diferentes exigencias proyectuales.

Una propuesta de detalles constructivos orientativos adecuados al clima gallego para la construcción con paja. Los cuales son obtenidos analizando las características de la paja y seleccionando el sistema constructivo más adecuado que deriva de la respuesta al primer objetivo.

Debido a esta contribución, y como se demuestra a lo largo de toda la investigación, queda patente que la construcción con paja en forma de módulos prefabricados es posible en Galicia y además su desarrollo sería positivo para la arquitectura.

La arquitectura siempre ha sido el reflejo de la sociedad, debido a esto debe buscar las sensibilidades de cada momento. En la actualidad se está realizando un gran esfuerzo para, mediante la innovación continua, conseguir alcanzar la independencia de los recursos no renovables y la mejora continua del confort en las edificaciones.

En el ámbito de la arquitectura, la forma más significativa de tener un impacto positivo en estos objetivos es mediante el diseño y la elección de materiales.

A lo largo de la disertación se hace un análisis en profundidad sobre la paja. Probando que es perfectamente adaptable a las condiciones de Galicia y que cumple las demandas actuales de las edificaciones.

Las diferentes exigencias, ya sean de aislamiento, como de resistencia a factores bióticos y abióticos, son superadas satisfactoriamente por el material. Unido a sus otras características deseadas como son la de ser renovable y capturar CO₂, logran que sea un material no solo adecuado sino deseable.

Este material por sí solo no es capaz de solucionar todos los casos constructivos ni se pretende que lo haga, sino que sea un material entre muchos otros que sea capaz de sustituir en gran medida a materiales que, de forma directa o indirecta, no son adecuados para nuestra sociedad.

Es por esto que se vuelve tan importantes este tipo de investigaciones, que permitan demostrar su viabilidad en los diferentes contextos y que los arquitectos hagan uso de ellas para trasladarlo a la realidad mediante proyectos de arquitectura.

De forma más concreta y para especificar las consideraciones finales se hará en función de los objetivos que ha tenido esta investigación.

Objetivo 1:

Definir un catálogo de los principales sistemas de construcción con fardos de paja y técnicas contemporáneas con paja en España.

Este catálogo nacional se realizó mediante el análisis de 3 proyectos de cada uno de los principales sistemas constructivos con paja en uso en España. Identificando la información general, espacial y constructiva de cada uno de ellos.

Los sistemas estudiados son el Sistema Nebraska o de Muros portantes, Sistema de postes y vigas o de relleno, Sistema CUT y el Sistema Prefabricado.

El estudio ha llevado al conocimiento de características generales de la construcción con paja, compartidas por todos los sistemas y que responden a diferencias en el contexto geográfico del proyecto. Ejemplos de esto son el alero y los sobrecimientos.

De forma específica existen características diferenciadas en función del sistema constructivo concreto. Este tipo de características son tendencias observables derivadas de la forma en que se construyen cada uno de ellos.

Se destaca en este apartado cuestiones como el tamaño, número de alturas, luces máximas. El Sistema Prefabricado destaca como el sistema usado para proyectos de mayor tamaño, seguido del de Postes y Vigas. En contraposición, el Sistema Nebraska es utilizado para los proyectos de menor tamaño, siendo estos siempre de una única altura.

En cuanto a las aperturas, ya sea en número y tamaño, no se han encontrado diferencias significativas a excepción de los proyectos donde una pared entera es acristalada. Esto es debido a que suele usarse madera estructural, especialmente para reforzar los marcos de puertas y ventanas. En cuanto a las luces máximas el sistema de Postes y Vigas alcanza unos espacios interiores de mayor tamaño, debido a que la función estructural es enteramente hecha por la madera.

Cada sistema, por tanto, presenta sus propias características. Es en este punto donde se puede comprender la influencia y adecuación que tiene cada

uno de los sistemas para el proyecto de arquitectura. De esta forma se puede mejorar la calidad proyectual, escogiendo el sistema idóneo a las necesidades proyectuales.

Para el caso de un proyecto de arquitectura, donde se quiere tener la mayor libertad proyectual posible, permitiendo mayores superficies útiles, libertad en las alturas, la posibilidad de aperturas de forma libre el sistema más adecuado sería el sistema prefabricado. Sistema en el cual debemos contar con otras ventajas de rápida ejecución, así como sencillez y estandarización en el cálculo estructural.

Objetivo 2:

Definir los sistemas de construcción y los detalles constructivos que mejor se adaptan a la construcción de paja en Galicia.

Teniendo en cuenta las características gallegas, el segundo objetivo busca hacer un análisis en profundidad entre la relación de los aspectos físicos de la paja y como se traduce a los proyectos reales.

Basándose en los proyectos analizados en el primer objetivo y las soluciones comerciales existentes, se alcanzan una serie de recomendaciones tanto del tipo de sistema constructivo más adecuado como del diseño en forma de detalles constructivos tipo que permiten un buen funcionamiento de la edificación.

En el primer apartado, 4.1, se lleva a cabo la relación de cada uno de los aspectos físicos, previamente analizados en el marco teórico, con las medidas necesarias que se deben tomar en el diseño para lograr un correcto funcionamiento del material. Se utilizan, además, para permitir un análisis más sólido detalles constructivos de diferentes casas comerciales y literatura al respecto.

Los factores estudiados son el control de temperatura, los diferentes tipos de humedades, protección contra el fuego y el aislamiento acústico. Este trabajo previo permite conocer en profundidad como se materializa el comportamiento físico de la paja. Permitiendo posteriormente la propuesta, en el punto 4.2, de los detalles constructivos de la envolvente.

Se detalla toda la envolvente, analizando los puntos del sistema prefabricado de paja los cuales son más propensos a crear problemas en la edificación. La

Figura 110 muestra los puntos escogidos para la propuesta del detalle tipo, siendo estos el encuentro de la cimentación con sobrecimientos y muros, el encuentro de muro y cubierta y los detalles de ventanas y puertas.

La propuesta de los detalles es la síntesis de todo el trabajo, generando una guía detallada y razonada de cómo debería ser el diseño de una edificación en paja que permita su buen funcionamiento en Galicia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albareello, L., Digneffe, F., Hiernaux, J.-P., Maroy, C., Ruquoy, D., & de Saint-Georges, P. (1997). *Prácticas y Métodos de Investigación en Ciencias Sociales*. Bruselas: Gradiva.
- Alen y Calche. (s.f.). *Alen y Calche*. Recuperado el 26 de Junio de 2021, de <http://alenycalche.es>
- Arch20. (s.f.). *Arch20*. Recuperado el 9 de Junio de 2021, de <https://www.arch2o.com/5-projects-using-hempcrete-environmental-material/>
- Arfin, F. (6 de Junio de 2019). *TripSavvy*. Recuperado el 3 de Junio de 2021, de <https://www.tripsavvy.com/fairy-tale-cottages-under-thatch-4050845>
- Arquitectura y Salud*. (s.f.). Recuperado el 16 de Junio de 2021, de <https://www.arquitecturaysalud.com/bioconstruccion/ejemplos-de-bioconstruccion/cut>
- Ash, C., Aschheim, M., & Mar, D. (2003). *In-Plane Cyclic Test of Plastered Straw Bale Wall Assemblies*. Chicago, IL, USA: University of Illinois.
- Ashour, T., & Wu, W. (s.f.). Using Barley Straw As Building Material. En *Barley: Production, Cultivation and Uses* (pág. Capítulo 12). Nova Science Publishers, Inc.
- Atelierschmidt*. (2002). Recuperado el 30 de Mayo de 2021, de Haus B-D: <https://www.atelierschmidt.ch/haus-bd-disentis>
- Atkinson, C. (2008). *Energy Assessment of a Straw Bale Building*. Londres, Gran Bretaña: University of East London.
- Bala-Box. (24 de Mayo de 2021). *Bala-Box*. Obtenido de <http://bala-box.com/>
- Blank, H. F., Schwarzburg, H. W., & Altherdt, J. H. (11 de Mayo de 2021). *Small Farmers Journal*. Obtenido de <https://smallfarmersjournal.com/stationary-baler-engineering-and-evidence/>
- Bodgan, R., & Biklen, S. K. (1994). *Investigação Qualitativa em Educação, Uma Introdução a Teoria e aos Métodos*. Rio de Janeiro: Porto Editora.
- Brojan, L., Weil, B., & Clouston, P. (2015). Air tightness of straw bale construction. *Journal of Green Building*, 10(1), 99-113. Obtenido de <https://meridian.allenpress.com/jgb/article/10/1/99/116144/AIR-TIGHTNESS-OF-STRAW-BALE-CONSTRUCTION>
- Carbone, C. (2003). *Mainstreaming Straw as a Construction Material; Understanding the Future of Bio-Base Architectural Materials*. Massachusetts, Estados Unidos: Massachusetts Institute of Technology.

- CLAAS Group. (s.f.). *Class Group*. Recuperado el 25 de Junio de 2021, de <https://www.claas-group.com/the-group/history/products/balers>
- Colorado Wheat. (8 de Julio de 2013). Recuperado el 3 de Junio de 2021, de [Colorado Wheat Harvesting Report: https://coloradowheat.org/2013/07/july-8-2013-colorado-winter-wheat-harvest-update/](https://coloradowheat.org/2013/07/july-8-2013-colorado-winter-wheat-harvest-update/)
- Concrete Centre. (2006). *Thermal Mass for Housing: concrete Solutions for the Changing Climate*. The Concrete Centre. Obtenido de <https://www.concretecentre.com>
- Construpedia. (2 de Mayo de 2021). Obtenido de <https://www.construmatica.com/construpedia/Turba>
- Crowley, J. (2001). *The Performance of Cannabis Sativa (HEMP) as a Fibre Source for Medium Density Fibre Board (MDF)*. Carlow, Irlanda: Crops Research Center Teagasc.
- Daehlen, M. (29 de Abril de 2021). *Science Norway*. Recuperado el 26 de Junio de 2021, de <https://sciencenorway.no/history/norwegians-were-intimidated-by-the-labour-movement-in-the-united-states/1852405>
- De Bruyne, P., Herman, J., & De Schoutheete, M. (1991). *Dinamica da pesquisa em ciências sociais: Os polos da pratica metodologica*. Rio de Janeiro: Francisco Alves.
- Déry, P., SC., B., & Sc., M. (2004). *Synthèse des expérimentations en architecture rurale du Groupe de recherches écologiques de la Batture (GREB)*. Quebec, Canada. Recuperado el 09 de Julio de 2021, de http://www.greb.ca/GREB/Technique_du_GREB_Comprendre_files/dossier_technique_du_greb.pdf
- EcoCocon. (17 de Marzo de 2021). Obtenido de <https://ecococon.eu/es/profesionales/descargas>
- EconHouse. (27 de Junio de 2021). *EconHouse*. Obtenido de <http://econhouse.es/>
- Econova Institute. (27 de Mayo de 2021). *Econova Institute Blog*. Obtenido de <https://econova-institute.com/blog>
- EcoPaja Green Building. (18 de Marzo de 2021). *EcoPaja*. Obtenido de <https://ecopaja.com/>
- Ecovive. (2 de Mayo de 2021). Obtenido de <https://ecovive.com/casas-de-paja/>
- Edifici di Paglia Italia. (26 de Julio de 2021). *Edifici di Paglia Italia*. Obtenido de <https://www.edificidipagliaitalia.com/progetti/ampliamento-di-una-casa-nel-valdobbiadene>
- Ekopanely. (s.f.). Recuperado el 13 de Mayo de 2021, de <https://www.ekopanely.es>
- Ekopanely Servis s.r.o. (12 de Mayo de 2021). *ekopanely.es*. Obtenido de www.ekopanely.com

- European Strawbale Gathering*. (2013). Recuperado el 29 de Mayo de 2021, de Urban Strawbale: <http://esbg2015.eu/urban-strawbale-loadbearing-acrobax-tearoom-library-and-concert-area-rome-italy-2013/>
- Framing and Country Live 1916*. (10 de Junio de 2016). Recuperado el 23 de Junio de 2021, de <https://www.facebook.com/farmingandcountrylife1916/>
- Fresno, M. (20 de Agosto de 2014). *Arquiteutu Tecnicu na Rede*. Recuperado el 3 de Mayo de 2021, de <https://arquiteututecnicu.com/2014/08/20/vivienda-unifamiliar-con-fardos-de-paja-en-gijon/>
- Fulcher, M. (9 de Noviembre de 2011). *Architecture Journal UK*. Recuperado el 2 de Junio de 2021, de <https://www.architectsjournal.co.uk>
- Gaines, T. (29 de Abril de 2021). *Farm Corrector*. Obtenido de <https://www.farmcollector.com/equipment/implements/hay-press-zmhz12fzbea/>
- Gil, A. C. (1995). *Método e Técnicas de Pesquisa Social*. Sao Paulo: Atlas.
- Gobierno de España. (2019). *Documento Básico HE - Ahorro de energía*. Obtenido de <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>
- Gobierno de España. (2019). *Documento Básico HR - Protección Frente al Ruido*. Obtenido de <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/ProteccionRuido.html>
- Golański, M. (2015). *THERMAL RENOVATION OF BUILDINGS WITH THE USE OF STRAW - EUROPEAN EXPERIENCE*. Zielona Góra, Polonia: University of Zielona Gora.
- Gonçalves Lopes, P. M. (2018). *Arquitetura em Palha, O Processo de Projeto (Dissertação)*. Coimbra: Universidad de Coimbra.
- Gross, C. (16 de 03 de 2009). *Structural Performance of Prefabricated Straw Bale Panels (Student thesis: Doctoral Thesis)*. University of Bath. Obtenido de <https://researchportal.bath.ac.uk/en/studentTheses/structural-performance-of-prefabricated-straw-bale-panels>
- Hall, K. (2006). *The Green Building Bible* (Vol. I & II). The Green Building Press.
- Hollis, M. (2005). *Practical Straw Bale Building*. Collingwood, VIC, Australia: LandLinks.
- Honrado, C. (26 de Julio de 2021). *Carolina Honrado Arquitectura Sostenible*. Obtenido de <https://www.carolinahonrado.com/2019/08/08/paneles-prefabricados-de-madera-y-paja-arropa/>
- IBUKU. (Diciembre de 2012). *IBUKU*. Recuperado el 15 de Junio de 2021, de <https://ibuku.com/>

- Jones, B. (2002). *Building with Straw Bales; A Practical Guide for the UK and Ireland*. Dartington, Reino Unido: Green Books.
- Kahn, L. (1979). *Cobijo*. (J. Corral, Trad.) Madrid, Madrid, España: Heroes, S.A.
- Karim, N. (22 de Julio de 2021). *Nude Office*. Obtenido de <http://www.nudeoffices.com/>
- Lamache, G. (1921). Fraiches en Été, Chaudes en Hiver, les Maisons de Paille Sont Avant Tout Économiques. *La Science et la Vie*(56).
- Lawrence, M., Drinkwater, L., Heat, A., & Walker, P. (2009). *Racking shear resistance of prefabricated straw-bale panels*. Reino Unido: University of Bath. Obtenido de <https://researchportal.bath.ac.uk/>
- LCA Architetti. (22 de Julio de 2021). Obtenido de <http://www.lcarchitetti.com/>
- Le Groupe de Recherches Écologiques de La Baie. (12 de Mayo de 2021). *greb.ca*. Obtenido de <http://greb.ca/>
- Lopez Altuna, A., & Iborra Lucas, M. (2015). *Prefabricated Modular Straw Walls and Panels For Houses and Building Renovation*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- López, A. (12 de Mayo de 2021). *casasdepaja.es*. Obtenido de <http://casadepaja.es/nebraska-o-greb/>
- Lynch, P. (20 de Agosto de 2016). *Plataforma Arquitectura*. Recuperado el 10 de Junio de 2021, de <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/793698/video-andamios-de-bambu-en-la-construccion-de-rascacielos-en-hong-kong>
- Magwood, C. (2016). *Essentia Hemcrete Construction*. Gabriola, Columbia Británica, Canadá: New Society.
- Magwood, C., Mack, P., & Therrien, T. (2005). *More Straw Bale Building: A Complete Guide to Designing and Building with Straw*. Gabriola Island, Canada: New Society Publishers.
- Miga Oficina Rural de Arquitectura. (21 de Julio de 2021). *Miga*. Obtenido de <http://eco-miga.es/>
- Minke, G., & Mahlke, F. (2006). *Manual de Construcción con Fardos de Paja*. Montevideo, Uruguay: Fin de Siglo.
- Miren, D. (22 de Julio de 2021). *Def Deco*. Obtenido de <http://www.decorarenfamilia.com/2020/05/vivir-en-una-casa-de-paja.html>
- ModCell. (24 de Mayo de 2021). *ModCell*. Obtenido de <https://www.modcell.com>
- Mompó García, M. (23 de Mayo de 2021). *Arquitectura y Empresa*. Obtenido de [arquitecturayempresa.es: https://arquitecturayempresa.es/noticia/casas-mudhif-arquitectura-de-paja-lodo-y-bambu](https://arquitecturayempresa.es/noticia/casas-mudhif-arquitectura-de-paja-lodo-y-bambu)

- Morphet, J., & Brammer, J. (26 de Enero de 2019). *PerthNow*. Recuperado el 24 de Junio de 2021, de <https://www.perthnow.com.au/business/agriculture/truck-convoy-delivers-thousands-of-hay-bales-from-wa-to-help-drought-affected-nsw-farmers-ng-b881085985z>
- Myrman, M., & MacDonald, S. (1997). *Build it with Bales (Version Two)*. Linden St, AZ, United States of America: Out on Bale.
- Nitzkin, R. (2019). Sistema CUT: original, relleno, SATE, orgánico, adaptaciones. *EcoHabitar*(61), 39. Recuperado el 20 de Junio de 2021, de <https://ecohabitar.org/articulos/sistema-cut-original-relleno-sate-organico-adaptaciones/>
- Nitzkin, R. (2021). Construcción con Paja: ¿De donde viene? ¿A donde va? En T. c. Co (Ed.). Vilanova de Cerveira.
- Nitzkin, R., & Termens, M. (2010). *Casas de paja, Una guía para auto constructores*. Teruel: EcoHabitar Visiones Sostenibles S.L.
- O'Down, J., & Quinn, D. (2005). *An Investigation of Hemp and Lime as Building Material*. Dublin, Irlanda: University College Dublin.
- Occupational Safety and Health Branch, Labor Department. (2017). *Code of Practice for Bamboo Scaffolding Safety*. Hong Kong. Obtenido de http://labour.gov.hk/eng/public/content2_8B.htm
- Okambuva.coop. (18 de Marzo de 2021). Obtenido de <https://www.okambuva.coop>
- Quivy, R., & Campenhoudt, L. V. (1992). *Manual de Investigaçao em Ciencias Sociais*. Lisboa: Grávida.
- Real Academia Española. (27 de Mayo de 2021). *RAE*. Obtenido de <https://dle.rae.es>
- Reas, A. (2010). *Arjen Reas Architecten*. Recuperado el 3 de Junio de 2021, de <https://www.arjenreas.nl/en/living-on-the-edge>
- reBive. (s.f.). Recuperado el 3 de Mayo de 2021, de <https://rebive.com/proyecto/vivienda-unifamiliar-con-fardos-de-paja/>
- Red de Construcción con Paja. (18 de Marzo de 2021). Obtenido de <https://www.casasdepaja.org>
- Réseau Français de la Construction en Paille. (2016). *Aislamiento y Soporte de Revestimiento. Reglas CP 2012*. Icaria.
- Ricketts, T. (Primavera de 2020). *Earth Building Magazine NZ*. Recuperado el 6 de Junio de 2021, de https://issuu.com/ebanz/docs/earth_building_magazine_-_spring_2020/s/11076249
- Rieznik Lamana, N., & Hernández Aja, A. (2005). *Análisis del Ciclo de Vida*. Madrid, España: Departamento de Urbanismo y Ordenación del Territorio de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

- Rockwool Group. (s.f.). *Rockwool*. Recuperado el 24 de Mayo de 2021, de <https://www.rockwool.com>
- Rodriguez Romo, J. C. (Enero-Junio de 2006). El bambú como material de construcción. *Conciencia Tecnológica*(31), 67-69. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94403115>
- Sala Nowotny, R. (24 de julio de 2021). Obtenido de <http://rafaelsala.es/>
- Salgado Velazquez, S. (2015). *Morfología de las Gramíneas*. Cárdenas, Tabasco, México: Universidad Popular de la Chontalpa. Obtenido de <https://es.slideshare.net/iHaDeZ/morfologia-gramineas>
- Searle, S., & Malins, C. (2013). *Availability of Cellulosic Residues and Wastes in the EU*. Washington, Distrito de Columbia, Estados Unidos: Internal Council on Clean Transportation.
- Sevalia, J., Siddhpura, N., Agrawal, C., Shah, D., & Kapadia, J. (2 de March de 2013). Study on Bamboo as Reinforcement in Cement Concrete. *International Journal of Engineering Reseach and Applications (IJERA)*, 3(2), 1181-1190. Obtenido de <http://ijera.com>
- Simmons, S. (4 de Octubre de 2018). *The Fence Post*. Recuperado el 28 de Mayo de 2021, de <https://www.thefencepost.com/news/living-outside-the-box-alternative-building-materials-give-homeowners-more-options/>
- Singh Yadav, R. (4 de Junio de 2019). *Down to Earth*. Obtenido de <https://www.downtoearth.org.in/blog/agriculture/stubble-burning-a-problem-for-the-environment-agriculture-and-humans-64912>
- Stanwix, W., & Sparrow, A. (2014). *The Hempcrete Book - Designing and Building with Hemp-Lime*. Cambridge, Inglaterra, Reino Unido: Green Books.
- Steen, A., Bill, S., & Bainbridge, D. (1994). *The Straw Bale House*. White River Junction, Vermont, USA: Chelsea Green Publishing.
- STEP Strawbale Training for European Professionals. (09 de Julio de 2021). *StrawBale.Training*. Obtenido de <https://strawbale.training/en/u4-wrapping/>
- Stroh Paille Paglia. (s.f.). Recuperado el 10 de Junio de 2021, de <https://stroh-paille-paglia.ch/maison-feuillette-cncp-1920-2013/>
- Studio Morison. (7 de Junio de 2021). *The Spaces*. Obtenido de <https://thespaces.com/studio-morison-builds-a-spiritual-sanctuary-out-of-straw-in-cambridgeshire/>
- Sutton, A., Clack, D., & Walker, P. (2011). *STRAW BALE. An introduction to low-impact building materials*. Garston, Gran Bretaña: BRE Group.
- Taller Karuna Casa de Paja. (18 de Marzo de 2021). *Taller Karuna*. Obtenido de <https://tallerkaruna.org>
- Teoría de Construcción*. (2 de Abril de 2017). Recuperado el 10 de Mayo de 2021, de <https://teoriadeconstruccion.net/blog/tableros-de-paja/>

- The Platte Basin Timelapse . (s.f.). *The Platte Basin Timelapse* . Recuperado el 25 de Junio de 2021, de <https://plattebasintimelapse.com/ed/chapter/nebraska-sandhills/>
- Turale, C. (11 de Febrero de 2020). *Agricultural Company*. Recuperado el 25 de Junio de 2021, de <https://news.agcocorp.com/news/hesston-by-massey-ferguson-introduces-bale-linkTM-bale-management-app>
- UNECE. (21 de Mayo de 2021). *UNECE*. Obtenido de <https://unece.org/media/news/356767>
- West Pannon Regional and Economic Development Public Nonprofit Ltd. (s.f.). *Living Folk Architecture - Western Transdanubian Region (HU), Intangible Cultural Heritage*. Interreg Central Europe. Obtenido de <https://www.interreg-central.eu/Content.Node/THATCH---THE-GOLD-OF-HEGYH-T.html>
- Whiteley, P. O. (Abril de 1995). The New Adobe. *Sunset*, 100-107. Obtenido de <https://www.thefreelibrary.com/The+new+adobes-a016998920>
- Wihan, J. (2007). *Humidity in Straw bale walls and its effect on the decomposition of Straw*. Londres, Inglaterra, Reino Unido: University of East London School of Computing and Technology. Obtenido de <https://strawbuilding.eu/humidity-in-straw-bale-walls-and-its-effect-on-the-decomposition-of-straw/>
- Wimmer, R., Gruppe Angepaste Technologie, & TU Wien. (s.f.). *Das S-House - Planen Und Bauen Für Zukunft*. Viena: GrAT.
- Zecchetto, M. (16 de Mayo de 2021). *Casa Pasiva*. Obtenido de <https://www.casapasiva.es>

ÍNDICE DE IMÁGENES

Figura 1. Escultura de Paja, Cambridgeshire, Inglaterra (Studio Morison, 2021).	10
Figura 2. Escuela en Paja, Malawi, África (Karim, 2021).	13
Figura 3. Mapamundi Ejemplos Construcciones en Paja (Autor).	16
Figura 4. Mudhif Iraq (Mompó García, 2021).	18
Figura 5. Andamiaje de Bambú en Hong Kong (Lynch, 2016).	19
Figura 6. Casa Sharma Springs, Indonesia (IBUKU, 2012).	19
Figura 7. Construcción a Base de Cemento de Cáñamo (Ricketts, 2020).	20
Figura 8. Pared de Bloques de Cemento de Cáñamo del Pierre Chevet Sports Center (Arch20, s.f.).	20
Figura 9. Morfología Gramínea (Salgado Velazquez, 2015, pág. 6).	21
Figura 10. Fachada Principal Casa Paja Living on the Edge, Zoetermeer, Holanda (Reas, 2010).	22
Figura 11. Fotografía Completa Casa Paja Living on the Edge, Zoetermeer, Holanda (Reas, 2010).	22
Figura 12. Fabricación Tradicional de Paja (West Pannon Regional and Economic Development Public Nonprofit Ltd).	22
Figura 13. Tejado de Paja en Reparación, Buckinghamshire, Inglaterra (Arfin, 2019).	22
Figura 14. Carro de Caballos Transportando Paja (Framing and Country Live 1916, 2016).	24
Figura 15. Convoy de 47 Camiones Transportando Fardos de Paja (Morphet & Brammer, 2019).	24
Figura 16. Empacadora Fija de Tracción Animal (Blank, Schwarzburg, & Altherdt, 2021).	25
Figura 17 . Empacadora Massey Ferguson 2370 (Turale, 2020).	25
Figura 18. Inmigrantes Noruegos en Norte América (Daehlen, 2021).	26
Figura 19. Casa a base de Turba, Primera Casa en Milton, Dakota del Norte, 1880 (Daehlen, 2021).	26
Figura 20. Sandhills de Nebraska (The Platte Basin Timelapse , s.f.).	27
Figura 21. Casa de los Simonton, Purdum, Nebraska, 1908.	27
Figura 22. Primera Casa de Paja en Europa, Maison Feuillet, Montargis, Francia (Stroh Paille Paglia, s.f.).	28
Figura 23. Timber Framing (Entramado de Madera) (Rockwool Group, s.f.).	29
Figura 24. Cosechadora, Colorado (Colorado Wheat, 2013).	32
Figura 25. Embaladora MAXIMUM LD 80 de 1963 (CLAAS Group, s.f.).	33
Figura 26. Muro Portante, Acrobax Librería y Sala de Conciertos, Rome, Italy, 2013 (European Strawbale Gathering, 2013).	35

Figura 27. Casa B-D, Desentis, Suiza, 2002 (Atelierschmidt, 2002).....	35
Figura 28. Izquierda, Sistema de Muro de Fardos de Paja Portante (Wimmer, Gruppe Angepaste Technologie, & TU Wien).....	36
Figura 29. Derecha, Sistema de Muro Pretensado Portante (Minke & Mahlke, 2006).....	36
Figura 30. Izquierda, Construcción Muros de la Maison Feuillet (Lamache, 1921).....	37
Figura 31. Derecha, Estructura de Esqueleto con Muro de Fardos de Paja por Delante (Minke & Mahlke, 2006).....	37
Figura 32. Casa de Postes y Vigas (Simmons, 2018).....	38
Figura 33. Sistema Híbrido Estructural (Myrman & MacDonald, 1997).....	39
Figura 34. Ampliación de una Vivienda con Paneles Prefabricados y Vigas de Madera (Edificio di Paglia Italia, 2021).....	39
Figura 35. Sistema Greb en Construcción (López, 2021).	40
Figura 36. Sistema Greb en Construcción (Déry, SC., & Sc., 2004, pág. 18).	40
Figura 37. SATE Fardos de Paja (Taller Karuna Casa de Paja, 2021).....	41
Figura 38. SATE Fardos de Paja (STEP Strawbale Training for European Professionals, 2021).	41
Figura 39. Sistema CUT (Arquitectura y Salud, s.f.).	42
Figura 40. Muro Sistema CUT (Nitzkin, 2019).	42
Figura 41. Construcción Paja a la Cal (Nitzkin & Termens, 2010, pág. 95).	43
Figura 42. Obra con Paneles Prefabricados (Okambuva.coop, 2021).....	45
Figura 43. Panel Prefabricado Recubierto con Madera (Honrado, 2021). ...	45
Figura 44. Fabricación Panel ModCell (ModCell, 2021).....	46
Figura 45. Proyecto Realizado con Paneles ModCell (ModCell, 2021).....	46
Figura 46. Proyecto en Construcción Usando Bala-Box (Bala-Box, 2021). .	46
Figura 47. Moldeado In Situ de Muro con Cemento de Cáñamo (Stanwix & Sparrow, 2014).	48
Figura 48. Aplicación de Cemento de Cáñamo Mediante Spray (Stanwix & Sparrow, 2014).	48
Figura 49. Panel Paja Ekopanely (Ekopanely, s.f.).	50
Figura 50. Tablero de Paja (Teoría de Construcción, 2017).	50
Figura 51. Ciclo de Vida de un Edificio (Econova Institute, 2021).....	53
Figura 52. Quema de Residuos Agrarios, Punjab, India (Singh Yadav, 2019).	55
Figura 53. Quema de Residuos Agrarios en Incineradora (UNECE, 2021).	55
Figura 54. Oscilación Temperatura Interior (línea azul) y Exterior (línea rosa) de una Casa de Paja (Atkinson, 2008, pág. 48).....	67
Figura 55. Caudal de Aire en Función de la Superficie de las Grietas (Brojan, Weil, & Clouston, 2015, pág. 106).	69

Figura 56. Gráfico Capacidad Aislante a Diferentes Frecuencias de Materiales Constructivos (Minke & Mahlke, 2006, pág. 37).	72
Figura 57. Resultados de la Encuesta Sobre las Causas de los Problemas por Humedad en Muros de Paja (Wihan, 2007, pág. 155).	75
Figura 58. Gráfico Rendimiento Resistencia al Desplazamiento Módulos de Paja 2m x 2m (Lawrence, Drinkwater, Heat, & Walker, 2009).	79
Figura 59. Gráfico de Resistencia a Compresión Hasta Fallo de Paneles Prefabricados con Mortero Aplicado (Lawrence, Drinkwater, Heat, & Walker, 2009).	80
Figura 60. Manual DIY Alfawall (Okambuva.coop, 2021).	85
Figura 60. Módulos Bala Box (Bala-Box, 2021).	86
Figura 62. Vivienda de EcoPaja (EcoPaja Green Building, 2021).	86
Figura 63. Plano Localización de las Industrias de Fabricación de Prefabricados con Paja (Autor).	88
Figura 64. Construcción Muro de Paja (Miren, 2021).	95
Figura 66. Fotografía Exterior Bustarviejo (Alen y Calche, s.f.).	100
Figura 65. Localización Vivienda en Bustarviejo (de Autor).	100
Figura 67. Imágenes Construcción Bustarviejo (Alen y Calche, s.f.).	101
Figura 68. Imágenes Construcción Casa Bonadal (Miga Oficina Rural de Arquitectura, 2021).	102
Figura 69. Imágenes Construcción Casa Porreres (Sala Nowotny, 2021).	103
Figura 70. Plantas y Fotografías Vivienda en Batres (Alen y Calche, s.f.).	104
Figura 71. Fotografías Vivienda en Batres (Alen y Calche, s.f.).	105
Figura 72. Fotografías Vivienda Borredà (Zecchetto, 2021).	106
Figura 73. Fotografías Vivienda Borredà (Zecchetto, 2021).	107
Figura 74. Planos y Fotografía Vivienda de Gijón (Fresno, 2014).	108
Figura 75. Fotografía Vivienda de Gijón (reBive, s.f.).	109
Figura 76. Fotografías y Planos de la Vivienda en Sevilla la Nueva (Alen y Calche, s.f.).	110
Figura 77. Fotografías y 3D Vivienda en Sevilla la Nueva (Alen y Calche, s.f.).	111
Figura 77. Fotografías y Planos de la Vivienda en Colmenar del Arroyo (Alen y Calche, s.f.).	112
Figura 79. Fotografías Vivienda Vilanova del Vallès (Zecchetto, 2021).	113
Figura 81. Plantas y Fotografías Vivienda en Arasán (Alen y Calche, s.f.).	114
Figura 80. Localización Vivienda en Arasán (de Autor).	114
Figura 82. Sección y Fotografías Vivienda en Arasán (Alen y Calche, s.f.).	115
Figura 83. Planos y Fotografía Vivienda en Valdemorillo (Alen y Calche, s.f.).	116
Figura 84. Fotografías Vivienda en Valdemorillo (Alen y Calche, s.f.).	117
Figura 85. Fotografías Vivienda en Olván (Zecchetto, 2021).	118

Figura 86. Fotografías Vivienda en Olván (Zecchetto, 2021).....	119
Figura 87. Casa de Madera, Paja y Corcho. Magnago, Italia (LCA Architetti, 2021).....	132
Figura 88. Sección de muro EcoCocon (EcoCocon, 2021).....	137
Figura 89. Sección Muro Alfawall (Bala-Box, 2021).....	137
Figura 90. Detalle Constructivo Muro Exterior EcoCocon (EcoCocon, 2021).	140
Figura 91. Detalle Composición Muro Alfawall (Okambuva.coop, 2021). ..	141
Figura 92. Detalle Muro con Junta Sellado Alfawall (Okambuva.coop, 2021).	141
Figura 93. Diferentes Soluciones al Revoco del Sistema de Postes y Vigas (Magwood, Mack, & Therrien, More Straw Bale Building: A Complete Guide to Designing and Building with Straw, 2005, pág. 138).....	141
Figura 94. Posibles Soluciones para Mejorar la Hermeticidad de un Muro de Paja (Brojan, Weil, & Clouston, 2015).....	142
Figura 95. Ilustración del Diseño de Aleros (Nitzkin & Termens, Casas de paja, Una guía para auto constructores, 2010).....	143
Figura 96. Muro de Fardos Sobre Zona de Salpicadura (Minke & Mahlke, 2006, pág. 30).....	144
Figura 97. Reducción de Salpicaduras (Minke & Mahlke, 2006, pág. 31)..	144
Figura 98. Impermeabilización de la Base del Muro (Minke & Mahlke, 2006, pág. 46).....	145
Figura 99. Cimentación y Estructura de Madera Vivienda Batres (Alen y Calche, 2021).....	145
Figura 100. Detalle Cumbrera (EcoCocon, 2021).....	146
Figura 101. Techo con Fardos de Paja Entre la Estructura (Minke & Mahlke, 2006, pág. 24).....	146
Figura 102. Detalle Cumbrera (Alen y Calche, 2021).	146
Figura 103. Detalle Cumbrera (Alen y Calche, 2021).	146
Figura 104. Detalle Cumbrera (Zecchetto, 2021).....	146
Figura 105. Detalle Cumbrera (Zecchetto, 2021).....	146
Figura 106. Construcciones con Paneles Prefabricados (EcoCocon, 2021).	147
Figura 107. Composición Fachada Revestida Mortero Alfawall (Okambuva.coop, 2021).	149
Figura 108. Composición Fachada Ventilada Alfawall (Okambuva.coop, 2021).....	149
Figura 109. Detalle Constructivo Muro Exterior EcoCocon (EcoCocon, 2021).	149
Figura 110. Esquema Localización de los Detalles Constructivos (Autor).	151
Figura 111. Detalle Unión Paramento Exterior con Cimentación (Autor)...	152
Figura 112. Detalle Unión Paramento Exterior con Cubierta (Autor).	154

Figura 113. Detalle Puerta y Ventana (Autor).	155
Figura 114. Edificación en paja más grande de UK, Bioscience Nottingham University (Fulcher, 2011).	158

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Variedades de Plantas Cultivadas por sus Fibras, Ordenadas por su Localización de las Fibras en la Planta.	17
Tabla 2 – Medidas de los Fardos se Paja Rectangular (Minke & Mahlke, 2006, pág. 17).....	34
Tabla 3 – Polución Emitida en la Producción de Materiales (Jones, 2002). 56	
Tabla 4. Valores Límite de Transmitancia Térmica CTE (Gobierno de España, 2019).....	62
Tabla 5 – Valor Aislante Cerramientos Verticales (Jones, 2002).....	63
Tabla 6 – Capacidad de Calor Específica de Materiales de Construcción (Atkinson, 2008).....	64
Tabla 7 – Capacidad Calórica Específica por Volumen (Atkinson, 2008). ...	65
Tabla 8. Caudal de Aire a una Presión de 50 Pa (Brojan, Weil, & Clouston, 2015, pág. 103).....	69
Tabla 9 – Ensayo a los 90 Días de la Resistencia de Mortero (Lawrence, Drinkwater, Heat, & Walker, 2009).....	78
Tabla 10 – Características Generales Módulos Alfawall (Okambuva.coop, 2021).....	89
Tabla 11 – Dimensionamiento de Módulos Alfawall (Okambuva.coop, 2021).	89
Tabla 12 – Características Técnicas Módulos Alfawall con revestimiento interno (4cm de arcilla) y externo (4cm arcilla y cal hidráulica natural NHL3.5) de mortero (Okambuva.coop, 2021).	90
Tabla 13 – Características Medioambientales y del Ciclo de Vida de los Módulos Alfawall (Okambuva.coop, 2021).....	90
Tabla 14 - Características Generales Módulos Bala Box (Bala-Box, 2021). 91	
Tabla 15 – Tamaños y Coste Módulos Bala Box (los precios ni incluyen IVA ni transporte) (Bala-Box, 2021).....	91
Tabla 16 – Características Técnicas Módulos Bala Box (con revestimiento no especificado) (Bala-Box, 2021).....	92
Tabla 17 – Características Generales de los Módulos EcoPaja (EcoPaja Green Building, 2021).	92
Tabla 18 – Dimensionamiento de los Módulos EcoPaja (EcoPaja Green Building, 2021).....	92
Tabla 19 – Características Técnicas de los Módulos EcoPaja (EcoPaja Green Building, 2021).	93

