

ESTUDIO Y APLICACIONES DE LAS CONSTRUCCIONES CON FARDOS DE PAJA

BENEFICIOS DE LOS MATERIALES NATURALES

AUTOR: CARLOS MARTÍNEZ SAÑUDO
TUTOR: FÉLIX JOVÉ SANDOVAL
FECHA: SEPTIEMBRE 2019



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID



ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO Y APLICACIONES DE LAS CONSTRUCCIONES CON FARDOS DE PAJA

BENEFICIOS DE LOS MATERIALES NATURALES

ALUMNO

CARLOS MARTÍNEZ SAÑUDO

TUTOR

FÉLIX JOVÉ SANDOVAL

SEPTIEMBRE 2019

RESUMEN.

La paja es un material primigenio que se empezó a utilizar desde los primeros asentamientos humanos. En la actualidad, la problemática en cuanto a la gestión de los recursos del planeta y el impacto que provoca sobre ellos el sector de la construcción, hace que se vuelvan a plantear el uso de materiales naturales como la paja. Sus cualidades materiales junto al uso de las posibilidades tecnológicas actuales, favorecen la construcción de edificaciones más saludables, naturales y sostenibles.

La primera construcción documentada con fardos de paja data de 1886, surgiendo así la "técnica Nebraska". Fruto de la investigación y el desarrollo en este sistema nacen las diversas técnicas actuales. Mediante el estudio de estos tipos de construcción se pretende ampliar los conocimientos y las posibilidades que ofrece este material.

PALABRAS CLAVE.

Asentamientos humanos, material, recursos naturales, impacto, sector de la edificación, posibilidades, tecnología, saludables, sostenibles, desarrollo, técnicas de construcción, ampliar, conocimiento.

ABSTRACT.

Straw is a primary material that began to be used since the first human settlements. At present, the problematic regarding the management of the planet's resources and the impact that the construction sector causes on them, makes the use of natural materials such as straw be raised again. Its material qualities, together with the use of current technological possibilities, favor the construction of healthier, natural and sustainable buildings.

The first documented construction with bales of straw dates from 1886, thus emerging the "Nebraska technique". As a result of research and development in this system, the various current techniques are born. By studying these types of construction it is intended to expand the knowledge and possibilities offered by this material.

KEYWORDS.

Human settlements, material, natural resources, impact, building sector, possibilities, technology, healthy, sustainable, development, construction techniques, expand, knowledge.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. SOCIEDAD Y NATURALEZA	11
1.2. DEMANDA DE UN DISEÑO SOSTENIBLE EN LA EDIFICACIÓN	15
1.3. UNA ARQUITECTURA AMBIENTALMENTE CONSCIENTE. BIOCONSTRUCCIÓN CON PAJA	17
2. LA PAJA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN. UN APORTE A LA SUSTENTABILIDAD	18
3. BENEFICIOS HUMANOS, ECOLÓGICOS Y CONSTRUCTIVOS DE LA CONSTRUCCIÓN CON PAJA	20
3.1. BENEFICIOS HUMANOS	20
3.2. BENEFICIOS ECOLÓGICOS	21
3.3. BENEFICIOS CONSTRUCTIVOS. ASPECTOS TÉCNICOS	22
4. HISTORIA DE LA CONSTRUCCIÓN CON PAJA. PRIMERAS CONSTRUCCIONES	32

5. EVOLUCIÓN DE LA TÉCNICA – SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE MUROS CON FARDOS DE PAJA	35
5.1. MUROS DE FARDOS DE PAJA PORTANTES O AUTOPORTANTES. “TÉCNICA NEBRASKA”	36
5.2. MUROS DE FARDOS DE PAJA NO PORTANTES O DE RELLENO	40
5.2.1. SISTEMA DE POSTES Y VIGAS	40
5.2.2. SISTEMA GREB	44
5.3. MUROS DE FARDOS DE PAJA MIXTOS	47
5.3.1. SISTEMA CUT (CÉLULAS BAJO TENSIÓN)	47
5.3.2. SISTEMA PREFABRICADO MODULAR	51
5.4. SISTEMA WRAPPING O DE FORRADO	53
6. CONCLUSIONES	54
7. BIBLIOGRAFÍA	55



¹ Relación de arquitectura con paja y naturaleza. Swalmen.

1. INTRODUCCIÓN.

La toma de conciencia sobre el entorno, es lo que lleva a formular modelos o aplicación de técnicas de diseño y construcción para edificaciones verdes, edificaciones con opciones de sostenibilidad, procesos constructivos a favor de las arquitecturas de tierra que evocan la presencia de los cuatro elementos de la naturaleza: tierra, agua, aire y fuego, en los procesos de la vida en justa proporción, donde si analizamos esta proporción para aproximarnos a la óptima, desde una perspectiva biológica, que considera la resonancia entre la arquitectura y sus moradores, se pondrían en valor estas arquitecturas de tierra, ya que en combinación con la piedra para los cimientos, la madera para las techumbres, la arcilla cocida para cubiertas y las formas dadas a estos materiales, resuelven la armonía de estos elementos. La tierra, y su forma simbólica asociada, el círculo, han resuelto históricamente el fundamento de la arquitectura habitacional. (Obra Bioética, 2001,31)¹

¹ Osorno Bautista, Claudia Yolanda. "Bioética como puente entre ciencia y sociedad". 2001.

La biología del ser humano en relación con el devenir de la sociedad actual, nos invita a replantearnos si estamos caminando hacia un desarrollo – evolución –, respetuoso, saludable, enriquecedor...de la humanidad y su propia naturaleza como ser vivo.

Todo parece indicar que la evolución que está experimentando la humanidad, en los últimos siglos, se está encaminando hacia la autodestrucción... y, ¿no se supone a la raza humana (homo sapiens) como seres de una inteligencia suprema? Deberíamos utilizar todas esas capacidades para revertir la situación y tomar el camino del desarrollo sostenible en comunidad con nuestro planeta – la Tierra – haciendo uso de todos los recursos a nuestro alcance: inteligencia, tecnología, recursos naturales, etc.

Como tema de actualidad, en nuestra sociedad, el cambio climático es una realidad y hoy día se empiezan a percibir lo contundente de sus consecuencias catastróficas. Pues bien, es el sector de la construcción (40-50% del flujo de la economía mundial) uno de los principales causantes (actividad humana) del agotamiento de los recursos naturales, de la transformación del medio, de la emisión de Gases de Efecto Invernadero a la atmosfera, así como de la generación de una cantidad de residuos que el planeta ya no puede administrar, admitir, procesar.

En este contexto y como futuros profesionales en el sector de la edificación es que surgen las motivaciones de este trabajo que se va a centrar en los beneficios del uso de materiales naturales – que necesitan un procesamiento industrial casi nulo – como son la paja principalmente, la madera, la tierra...a la hora de diseñar futuros espacios o reconvertir los ya existentes, así como las posibilidades de aplicación de estos materiales en la arquitectura.

1.1. SOCIEDAD Y NATURALEZA.

“...el disfrute del paisaje emplea la mente sin fatigarla; aun así la ejercita, la tranquiliza y la anima; entonces, por la influencia de la mente sobre el cuerpo, da el efecto de descanso refrescante y revitalización de todo el sistema...” (Olmsted, 1993).

La población mundial continúa urbanizándose, situación que va en detrimento de la salud, el bien estar de los individuos y, por ello, de la sociedad en general. Es bien sabido (por numerosos estudios) que este proceso de urbanización de la sociedad o sociedad industrial se traduce en una desvinculación inminente del ser humano y la naturaleza, situación que refleja una sociedad que camina hacia el futuro “enfermando” a cada paso, es decir, la alienación del individuo en esta sociedad postindustrial conlleva a una sociedad “enferma”.

Son muchos los teóricos, científicos y profesionales del diseño, entre ellos numerosos arquitectos, que han trabajado y lo continúan haciendo para definir los aspectos de la naturaleza que más influyen en la satisfacción del individuo con el entorno construido. Para lo cual se ha establecido el término “biofilia”. Actualmente este término, germinado en los campos de la biología y la psicología, ha evolucionado adaptándose en los campos de la neurociencia, endocrinología y arquitectura, entre otros, concibiéndose como el diseño que nos reconecta con la naturaleza.

A lo largo de la historia todas las culturas (civilizaciones) del mundo han llevado la naturaleza a sus edificaciones y espacios públicos más allá de la mera representación de la misma, desde los primeros asentamientos en el neolítico, continuando con el origen vitruviano de la cabaña primitiva, hasta las últimas arquitecturas más contemporáneas. Esto demuestra que...

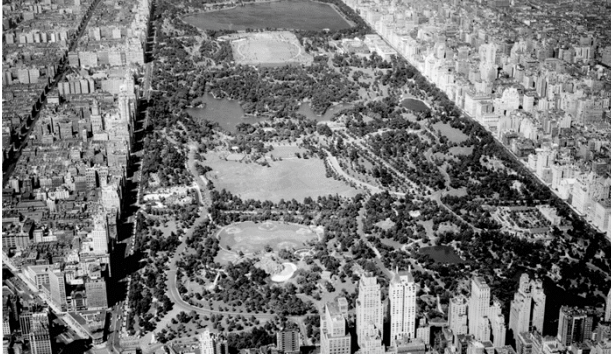
“...La consistencia de los temas naturales en las estructuras y lugares históricos sugiere que el diseño biofílico no es un fenómeno nuevo; más bien, como campo de la ciencia aplicada, es la codificación de la historia, de la intuición humana y de la neurociencia, que muestra que las conexiones con la naturaleza son vitales para que mantengamos una existencia saludable y vibrante como especie urbana...”²



² Cabaña primitiva de Vitruvio

² “14 Patrones de Diseño Biofílico – Mejorando la salud y el bienestar en el entorno construido”. William Browning, Hon; Catherine Ryan; Joseph Clancy. 2014, Terrapin Bright Green, LLC.

ESTUDIO Y APLICACIONES DE LAS CONSTRUCCIONES CON FARDOS DE PAJA | BENEFICIOS DE LOS MATERIALES NATURALES



Los seres humanos han vivido una existencia agraria pasando la mayoría del tiempo de sus vidas entre la naturaleza, conducta social que comenzó a cambiar con la Revolución Industrial. Una vez instaurada la Sociedad Industrial las poblaciones urbanas crecían en el s.XIX y quienes se encargaron de las reformas, comenzaron a preocuparse cada vez más por los problemas de salud y salubridad del entorno construido. Un ejemplo de ello fue el arquitecto paisajista Frederick Law Olmsted quien encabezó una campaña para mejorar la salud y reducir el estrés de la vida urbana, mediante la construcción y diseño de grandes parques públicos.



“...Artistas y diseñadores de la era victoriana, como el influyente pintor y crítico de arte inglés John Ruskin, se apartaron de lo que se veía como la experiencia deshumanizante de la ciudad industrial. Estas personas abogaban por objetos y edificaciones que reflejaran la mano de los artesanos y que buscaran inspiración en la naturaleza.

Las actitudes occidentales hacia la naturaleza fueron cambiando hacia la mitad del siglo XIX, así como, los requisitos para una vivienda saludable en Europa y Estados Unidos; Henry David Thoreau construyó una más simple, conectada a la naturaleza.

La inspiración en la naturaleza estaba a plena vista en el Art Nouveau, en diseños de finales del siglo XIX. Las exuberantes plantas del arquitecto Víctor Horta entrelazadas en edificios en Bélgica, las opulentas flores convertidas en las lámparas Tiffany de Louis Comfort y las formas explícitamente biomórficas en las edificaciones de Antonio Gaudí, aun hoy son referentes. En Chicago, Louis Sullivan creó complejos ornamentos con hojas y cornisas que representaban ramas de árboles. Su protegido, Frank Lloyd Wright, es parte del grupo que inauguró la Escuela de la Pradera.

Wright abstraigo las flores y plantas de la pradera en sus vitrales y ornamentos. Como muchos en el movimiento Craftsman, Wright también abrió los espacios interiores que fluían por las casas de maneras que no se habían propuesto antes y creó vistas panorámicas balanceadas con refugios íntimos. Sus últimos diseños incluían espacios estimulantes como el balcón en voladizo sobre la caída de agua en Fallingwater [La Casa de la Cascada].



³ Greensward Plan 33. Frederick Law Olmsted.

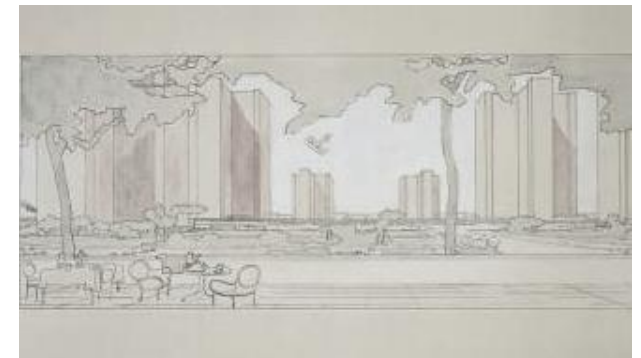
⁴ Cabaña Walden Pond. Henry David Thoreau.

⁵ Fallingwater “La Casa Cascada”. Frank Lloyd Wright.

Los modernistas europeos retiraron mucha de la ornamentación de sus edificaciones, pero, al igual que Wright, usaron el grano de la madera y la veta de la roca como elementos decorativos y estaban igualmente ocupados en explorar la relación entre el interior y el exterior. Ludwig Mies van der Rohe llevó estos conceptos al juego de volúmenes y cristal en su Pabellón de Barcelona, construido en 1929. Luego, su Casa Farnsworth, de 1951, definió el interior y exterior de forma más literal, separando esos elementos de la conexión visual con la naturaleza.

La Cité Radiant [Ciudad Radiante] de Le Corbusier, proyecto no construido de 1924, pudo haberse transformado en un diseño urbano desastroso, pero al poner torres en un parque rodeado de césped y árboles, Le Corbusier estaba tratando de darles a los habitantes de la ciudad conexiones con la naturaleza. Mientras se consolidaba, el Estilo Internacional diseminó edificios de cristal en cualquier parte; desafortunadamente, esas edificaciones, y especialmente los interiores de las edificaciones comerciales, desconectaron progresivamente a la gente de la naturaleza...”³

Es entonces cuando surge el término “biofilia”, El primero en usar este concepto fue el filósofo humanista Erich S. Fromm en *The Heart of Man (El Corazón del Hombre)* de 1964, posteriormente el biólogo Edward Wilson lo popularizó en *Biophilia (Biofilia)* de 1984; para referirse a la afinidad innata que la humanidad siente por los seres vivos y la naturaleza. Este término aplicado en el ámbito de la arquitectura se establece para reconducir el camino perdido de la civilización occidental hacia un deseo de reconexión con la naturaleza y los sistemas naturales. Aunque genéticamente seamos una especie predispuesta a preferir ciertos tipos de escenarios naturales, específicamente *la sabana*, tema propuesto por Gordon Orians y Judith Heerwagen en *Savanna Hypothesis [La hipótesis de la sabana]* (1986); donde hacen una reflexión acerca de las motivaciones de la humanidad para mudarse a las zonas urbanas donde el césped del jardín suburbano se convierte en una *sabana* para todos.



³ “14 Patrones de Diseño Biofílico – Mejorando la salud y el bienestar en el entorno construido”. William Browning, Hon; Catherine Ryan; Joseph Clancy. 2014, Terrapin Bright Green, LLC.

⁶ Pabellón de Barcelona. Mies Van Der Rohe.

⁷ Casa Farnsworth. Mies Van Der Rohe.

⁸ La Cité Radiant. Le Corbusier.

ESTUDIO Y APLICACIONES DE LAS CONSTRUCCIONES CON FARDOS DE PAJA | BENEFICIOS DE LOS MATERIALES NATURALES



“...En la actualidad la mayoría de la naturaleza de las sociedades modernas es diseñada, definiendo la naturaleza como los organismos vivos y los componentes no vivos de un ecosistema, y teniendo en cuenta la predisposición de la sociedad occidental por los paisajes de sabana, la mayoría de esos entornos diseñados como analogías de la sabana que pueden ser los jardines suburbanos y los campos de golf se tornan en monocultivos químicamente dependientes que, aunque hermosos, no son biodiversos, ni ecológicamente sanos o resistentes. Así como existen otros ecosistemas diseñados que, si son biodiversos, vibrantes y ecológicamente sanos, por ejemplo, los bosques altos para Canopy, con flora creciendo a baja altura, mantenida por las quemas anuales practicadas por los Ojibwe de Norte América. Y es entonces cuando se puede distinguir entre prácticas de diseño sostenibles, y prácticas insostenibles como han resultado ser la mayoría de las prácticas de la civilización occidental...”⁴



Como se ha mencionado anteriormente, el desarrollo de la civilización está suponiendo un cumulo de prácticas insostenibles que nuestro planeta no puede soportar. Junto a este desarrollo ha ido evolucionando una creciente preocupación por cómo se debe cambiar la dinámica de los hábitos de conducta. En relación al entorno construido – arquitectura – surge en 1990 el movimiento del edificio verde, que ha generado en las últimas décadas los estándares de la bioconstrucción. El objetivo principal de este movimiento es llevar a cabo unas prácticas de diseño sustentables en el ámbito de la profesión incorporando la “biofilia” por su contribución a la calidad de los ambientes internos y la conexión con el lugar.

⁹ Campamento Ojibwe.

¹⁰ Sociedad actual.

⁴ “14 Patrones de Diseño Biofílico – Mejorando la salud y el bienestar en el entorno construido”. William Browning, Hon; Catherine Ryan; Joseph Clancy. 2014, Terrapin Bright Green, LLC.

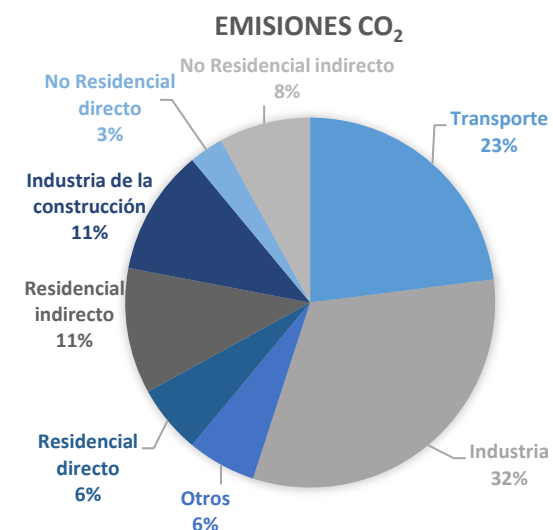
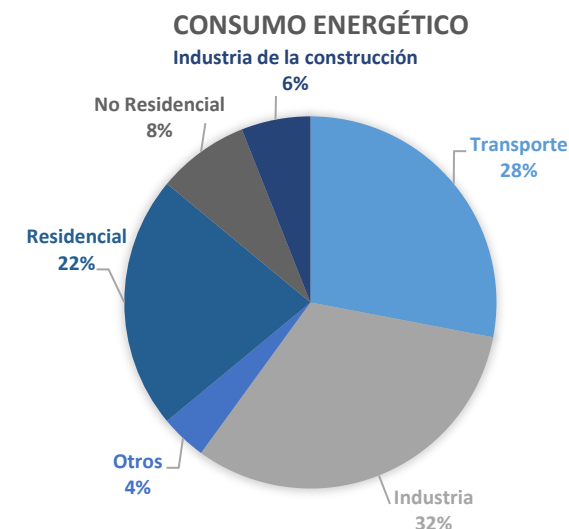
1.2. DEMANDA DE UN DISEÑO SOSTENIBLE EN LA EDIFICACIÓN.

Es de actualidad que el mundo se encuentra inmerso en una revolución verde, existe la creciente y generalizada preocupación debida al consumo energético, la emisión de gases de efecto invernadero y su repercusión en el medio ambiente, de ello, es una evidencia directa el cambio climático.

Esto es un problema que persigue a la sociedad actual desde que se celebró la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente (Estocolmo, 1972) donde se reunió a los máximos representantes de las naciones para frenar la degradación del planeta. Desde 1972, son numerosas las conferencias que se han efectuado, entre las que destacan; Cumbre de la Tierra sobre Medio Ambiente y Desarrollo (Rio de Janeiro, 1992); Conferencia sobre Cambio Climático (protocolo de Kioto-Kioto, 1997); la Cumbre Mundial del Desarrollo Sostenible (Johannesburgo, 2002) donde se trataron temas como el excesivo consumo de energía, la biodiversidad de las especies o la producción agrícola, afirmando la necesidad de un crecimiento en conformidad con el medio ambiente. Las conferencias han seguido sucediéndose año a año manteniendo el debate mundial sobre la problemática del cambio climático y el desarrollo sostenible, pero las posturas de los distintos actores estaban y han continuado estando enfrentadas.

Aunque muchos de los máximos representantes de las naciones siguen sin ponerse de acuerdo, es en la vigesimoprimer Conferencia Sobre Cambio Climático (Paris, 2015) cuando se establece un plan de acción para provenientes de la actividad humana, hasta límites que puedan ser absorbidos de forma natural por océanos, suelos y árboles.

En el cumplimiento de ese objetivo, el sector de la construcción tiene un papel relevante. De entre todas las actividades industriales y comerciales, la industria de la construcción es la que más consume, de la mano de otras asociadas a los recursos naturales como la madera, minerales, agua y energía. Otro de los problemas que genera la actividad constructora es que los edificios ya construidos siguen contaminando por las emisiones y el impacto que generan sobre el terreno donde se encuentran ubicados.



¹¹ Gráficas de consumo energético y emisiones de CO₂ en el sector de la edificación. 2018

No obstante, estos factores mencionados son los más relevantes hacia el impacto medioambiental, pero no los únicos. El producto edificio o vivienda supone un proceso de mayor complejidad: desde la extracción de la materia prima de las fuentes naturales, la consiguiente transformación de la materia mediante el procesamiento industrializado, pasando por su transporte y ejecución en obra, hasta el uso a lo largo de su vida útil y posterior demolición. El conjunto de todos estos procesos son la consecuencia de que el sector de la edificación sea el productor de hasta el 50% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Dicha complejidad es la que ha puesto freno a la mejora medioambiental del sector de la construcción, según un estudio de la Universidad Politécnica de Cataluña:

-El 60% de los materiales que se extraen de la litosfera, tienen como destino la construcción.

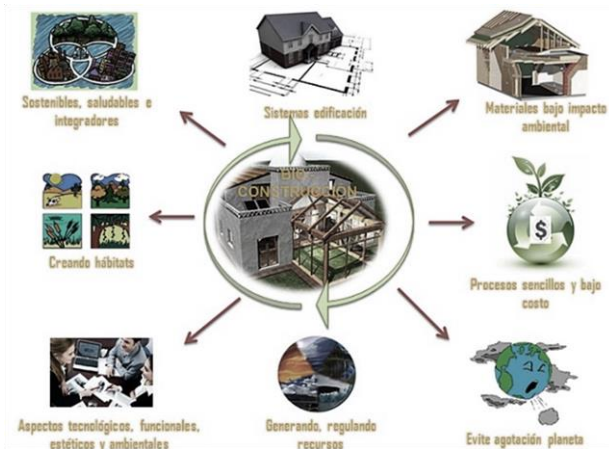
-El 50% de las emisiones de CO₂ emitidas a la atmósfera tienen su origen en la construcción y uso de los edificios.

-El 40% de la energía primaria consumida en el planeta y el 75% de la electricidad se destina a los edificios.

-El 20% del agua dulce es consumida en el uso de los edificios.

-El 60% de los residuos sólidos se producen en la construcción y deconstrucción de los edificios. 1,3 Tm por persona/año.⁵

A la vista de los datos citados, se hace imperante un profundo cambio en los valores de la cultura y el sector de la construcción, donde sean de aplicación principios de sostenibilidad como la conservación de los recursos naturales, la disminución del consumo de energía, una gestión y planificación del ciclo de vida correctas, así como la reutilización máxima de los recursos.



¹² Esquema de prestaciones de la bioconstrucción.

⁵ La Construcción Sostenible. Una Mirada Estratégica. Xavier Casanovas, 2009.

1.3. UNA ARQUITECTURA AMBIENTALMENTE CONSCIENTE. BIOCONSTRUCCIÓN CON PAJA.

“La bioconstrucción es construir con materiales naturales, con materiales del lugar, con los conocimientos de la gente, y muy importante con el clima y la topografía, con la situación local. Hay que pensar primero, analizar, antes que diseñar.”⁶

En relación a todo lo mencionado, abordamos el concepto de bioconstrucción, que nace como alternativa y complementación a la arquitectura convencional. La bioconstrucción plantea una serie de pautas y técnicas constructivas que permiten reducir al mínimo el impacto medioambiental de las edificaciones, y cuyo principal objetivo es la obtención de edificaciones saludables, naturales y sostenibles. Para ello, es fundamental el uso de materiales naturales que para su obtención tengan unos costes energéticos y unas emisiones de carbono cercanas a cero. Se puede encontrar una amplia gama de posibilidades que han sido desarrolladas a lo largo de las últimas décadas como las construcciones de tierra apisonada, superadobe, cob, bambú o con fardos de paja. Entre todas las técnicas citadas, este trabajo tiene la finalidad de estudiar las ventajas del uso de la paja como material de construcción y su aplicación en la arquitectura moderna.

La bioconstrucción con paja es un campo que, en las últimas décadas, está experimentando un desarrollo progresivo. Cada vez son más los ensayos, investigaciones, documentos y certificados oficiales que se están llevando a cabo por todo el mundo, acreditando a este tipo de construcciones como una alternativa viable contra el impacto medioambiental. Países como EEUU, Francia, Austria y Alemania (el último en incorporarse) han implementado en sus correspondientes códigos técnicos de la edificación una normativa explícita que permite el uso de las balas de paja como material de construcción. Si, además, se tiene en cuenta que, en los Estados Unidos existen ejemplos de casas aún hoy habitables con más de 100 años de antigüedad, junto al creciente número de edificaciones realizadas en todo el mundo, hacen del uso de la paja una realidad constructiva.



⁶ Según el arquitecto Prof. Dr. Ing. alemán Gernot Minke, considerado el padre de la bioconstrucción, define este concepto en una entrevista de Taller Karuna en el III Encuentro de la Red de Construcción con Paja.

¹³ Construcción de superadobe

¹⁴ Construcción con bambú. Great Wall House

¹⁵ Construcción con fardos de paja.

2. LA PAJA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN. UN APOORTE A LA SUSTENTABILIDAD

La paja es un material que la naturaleza produce anualmente y se encuentra disponible en casi todo el mundo. Como paja se considera al tallo seco de los cereales y plantas fibrosas, es decir, es la parte que esta entre la raíz y la espiga. Si bien todas son válidas, a la hora de utilizarlas para la fabricación de fardos de paja como material de construcción, son más recomendables la paja de trigo, escanda, arroz y centeno.

Según el arquitecto López Altuna, en el mundo se cultiva más de 600 millones de hectáreas de cereal, por cada tonelada de cereal que se produce para comer generamos 1,5 toneladas de paja – como residuo agrícola – cada año y más del 90% se quema. Por lo que la construcción con paja ofrece una nueva salida a las sobreproducciones de este residuo vegetal, evitando así la contaminación de la atmosfera. Se estima que solo con la paja sobrante en el Reino Unido, se podrían hacer unas 450.000 viviendas de 150 m² anualmente, todas ellas súper-aisladas.⁷

Si se valora la incorporación de CO₂ en el proceso de fotosíntesis durante el cultivo, se hace un aporte mayor al medio ambiente, que el daño que se realiza produciendo y transportando los fardos de paja a la obra, ya que, la única energía necesaria para su producción es la del tractor que la cosecha, la embala y el camión que la transporta a la obra. Por lo que comparado con otros elementos constructivos se puede afirmar que el uso de la paja como material de construcción no produce impacto ambiental.

Y es que las edificaciones aisladas térmicamente con balas de paja poseen unos saldos negativos respecto a las emisiones de CO₂ en el proceso de construcción. Comparando; para producir fardos de paja se necesitan unos 14 MJ/m³ de energía, mientras que la producción de lana mineral precisa unos 1077 MJ/m³ lo que supone un consumo energético 77 veces mayor.⁸



¹⁶ Cultivo de paja en todo el mundo.

¹⁷ Campo con paja embalada.

¹⁸ Quema de paja sobrante.

⁷ Jones, "Building With Straw Bales".

⁸ Gernot Minke. Friedemann Mahlke. "Manual de construcción con fardos de paja".

Otro factor importante a valorar en el equilibrio ecológico global de estas edificaciones es su comportamiento como residuo una vez terminado su ciclo de vida útil o como sobrante durante el proceso de construcción. De igual manera, este material orgánico se puede devolver a la biosfera sin necesidad de preocuparse por las emisiones contaminantes o por el hecho de que esto pueda suponer una transformación del medio.

Mencionado lo anterior se puede afirmar que la paja como material de construcción cumple los suficientes requisitos como para ser considerado un material sostenible.



¹⁹ Embaladora de paja.

²⁰ Recogida para transporte.

²¹ Descarga en obra.



3. BENEFICIOS HUMANOS, ECOLÓGICOS Y CONSTRUCTIVOS DE LA CONSTRUCCIÓN CON PAJA.

3.1. BENEFICIOS HUMANOS.

“¡Qué mejor manera de crear lazos comunitarios y ayuda mutua que hacerlo juntos! Hombres, mujeres, jóvenes y mayores... todos pueden participar en la obra y crear juntos.”⁹

Es un hecho que la sociedad humana está en constante evolución; desde los primeros cazadores – recolectores que empezaron a poblar la tierra, hasta la sociedad individualizada en la que vivimos en la actualidad. Esta evolución ha conllevado al cambio de una forma de vida marcada por la cooperación y la inexistente desempeña una labor específica, perdiéndose ese saber general que gozaban antes.

La utilización de la paja como sistema constructivo, con las facilidades de obtención y la abundante producción existente, supondría de alguna manera una involución a la forma de vida de estas primeras sociedades acercando el proceso al individuo y favoreciendo la cooperación entre ellos: familiares, amigos, allegados...

A nivel más personal contribuiría a aspectos fisiológicos y psicológicos, a edificaciones saludables, puesto que la paja es un material natural e inofensivo, generándose ambientes cálidos, amables y a la consecución de una fuerte identificación con la concepción de hogar, “las cuatro paredes propias” de la casa.

“Para todos los participantes en la construcción de la vivienda, es este un proceso enriquecedor, un vehículo para aprendizajes técnicos, generador de contactos, integrador y socializador.”¹⁰



^{22, 23} Construcciones con paja. Voluntarios.

²⁴ Construcción bóvedas de paja. Gernot Minke.

⁹ Rikki Nitzkin y Maren Termens. “Casas de Paja” Una guía para autoconstructores. 2016.

¹⁰ Gernot Minke. Friedemann Mahlke. “Manual de construcción con fardos de paja”.

3.2. BENEFICIOS ECOLÓGICOS.

Como se ha comentado en el apartado 2 de este trabajo, la paja es un material de construcción que no emite CO₂ u otros gases de efecto invernadero a la atmosfera, además se nutre de componentes que transforman el CO₂ del aire mediante el proceso de fotosíntesis ¹¹, es por esto que la paja como material de construcción tiene grandes ventajas ecológicas; por no decir que es el material más ecológico.

Si, además, se tiene en cuenta que en la ejecución de una edificación con balas de paja los otros materiales que complementan la construcción son: la madera y sus derivados proveniente de bosques con una gestión sostenible en cuanto a su aprovechamiento y explotación, tanto para estructura como para acabados; y los revocos de la paja que se hacen con barro, arcilla y cal, materiales obtenidos directamente de la tierra tienen un procesamiento industrial para su obtención que es casi nulo. Por lo tanto, las construcciones de paja se pueden considerar 100 % ecológicas.



¹¹ Gernot Minke. Friedemann Mahlke. "Manual de construcción con fardos de paja".

²⁵ Estructura de materiales naturales. Madera.

²⁶ Mezcla tierra y paja para revoco. Rafael Sala Nowotny.

²⁷ Casa de fardos de paja aplicando el revoco.

3.3. BENEFICIOS Y PRESTACIONES DE LAS CONSTRUCCIONES CON PAJA.

Las construcciones con balas de paja se componen de unos sistemas constructivos relativamente nuevos, es por esto, que está en continuo desarrollo y cada vez es mayor el abanico de posibilidades constructivas que ofrece este material. En este apartado nos vamos a centrar en los principales beneficios y prestaciones físicas de las construcciones con fardos de paja.

- PRESTACIONES COMO AISLANTE TÉRMICO.

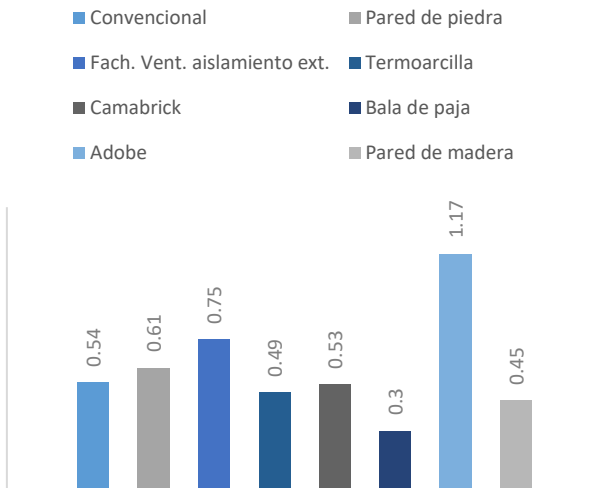
La capacidad como aislante térmico que poseen las balas de paja – como material de construcción – es la mayor de las prestaciones que ofrece este material.

Para que un material se considere como buen aislante térmico tiene que tener una conductividad térmica “ λ ” baja. En el caso de la paja, ésta puede variar en función de la densidad del fardo, de la orientación de las fibras que lo componen (paralelas o en contraposición al flujo de calor), del contenido de humedad de la misma, o incluso el tipo de paja que se utilice también puede suponer una pequeña variación.

La influencia, sobre la conductividad térmica, del contenido de humedad de las balas de paja es bastante menor que en los materiales de construcción minerales. Según Bauer (2000) ésta puede variar entre un 1 y un 7 % en presencia de una alta humedad, mientras que un cerramiento de ladrillos en las mismas condiciones de humedad, aumentaría considerablemente su conductividad térmica.¹²

Todos estos condicionantes hacen que la determinación de los resultados de la conductividad térmica “ λ ” de una bala de paja sea muy variable. Los valores medios varían entre 0,0337 y 0,086 W/mK. Tras varios estudios llevados a cabo en diferentes países de Centroeuropa, se ha establecido que el fardo de paja con una densidad media de entre 90 y 110 Kg/m³, posee una conductividad térmica “ λ ” igual a 0,045 W/mK.¹³

TRANSMITANCIAS TÉRMICAS



²⁸ Gráfica de transmitancias térmicas de diferentes materiales de construcción

¹² Bauer et al.: “Nachwachsende rohstoffe im Bauwesen” en Gesundheits-Ingenieur, 2000/vol.3

¹³ McCabe, Joseph. The Thermal Resistivity of Straw Bales for Construction. Tesis de graduación. Universidad de Arizona, 1993. GraT 2001 y Feb. 2000.

3 | BENEFICIOS HUMANOS, ECOLÓGICOS Y CONSTRUCTIVOS DE LA CONSTRUCCIÓN CON PAJA

Cuando se trata de comprobar el aislamiento térmico que ofrece un material también es relevante comprobar su valor de transmitancia térmica (U), que es el valor de la resistencia que ofrece un sistema o elemento constructivo al paso de la energía térmica. Cuanto menor sea el valor de ésta mejor será su comportamiento térmico. En la siguiente gráfica se puede observar los valores de la transmitancia térmica de distintos materiales constructivos.

Otro parámetro importante a tener en cuenta para medir el confort térmico que ofrecen los muros de balas de paja es la inercia térmica (I), este último parámetro va directamente relacionado con la masa térmica. Puesto que la paja es un excelente aislante si se le añade masa térmica a los muros (arcilla, ladrillo, tierra o cemento) se puede aprovechar la capacidad de almacenar calor o frío, para después disipar dicha energía en función de la variación de temperatura, para obtener unas condiciones de confort térmico en el interior de la edificación que suponen un ahorro energético considerable en cuanto al uso de calefacción en invierno o refrigeración en verano. En este contexto el revoco, tanto del interior como del exterior, tienen un papel fundamental para aprovechar al máximo las cualidades de las balas de paja, y es el de aportarle masa térmica a los muros.

Según el arquitecto y científico Prof. Dr. Ing. Gernot Minke, en la Universidad de Kassel, Alemania; ensayado un muro de 42 cm de espesor que se compone de 35 cm de paja y dos capas de revoco que suman 7 cm, se obtiene un valor de transmitancia térmica (U) igual a $0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$. Y si se tiene en cuenta una estructura de madera en la construcción el resultado puede variar hasta los $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$. Resultados que cumplen con los parámetros de las casas pasivas o passiv houses, que establecen un valor de U menor o igual a $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$.¹⁴



¹⁴ Estándares exigidos por el Passivhaus Institut. Gernot Minke. Friedemann Mahlke. "Manual de construcción con fardos de paja". Pág.30.

^{29, 30} Aula seminario. Universidad Kassel (Alemania). 2000. Gernot Minke y Friedemann Mahlke.

Para poder tener una idea de la capacidad como aislante térmico de un fardo de paja colocado de canto (fibras colocadas transversalmente al flujo de calor) con un espesor, según las medidas estándar, de unos 35 a 38 cm sería el equivalente a otros materiales de:

- 18 cm de Poliuretano.
- 25 cm de Lana de roca o vidrio.
- 30 cm de Poliestireno expandido.
- 75 cm de Madera ligera.
- 140 cm de Madera pesada.
- 660 cm de Bloques de hormigón.
- 1080 cm de Hormigón.

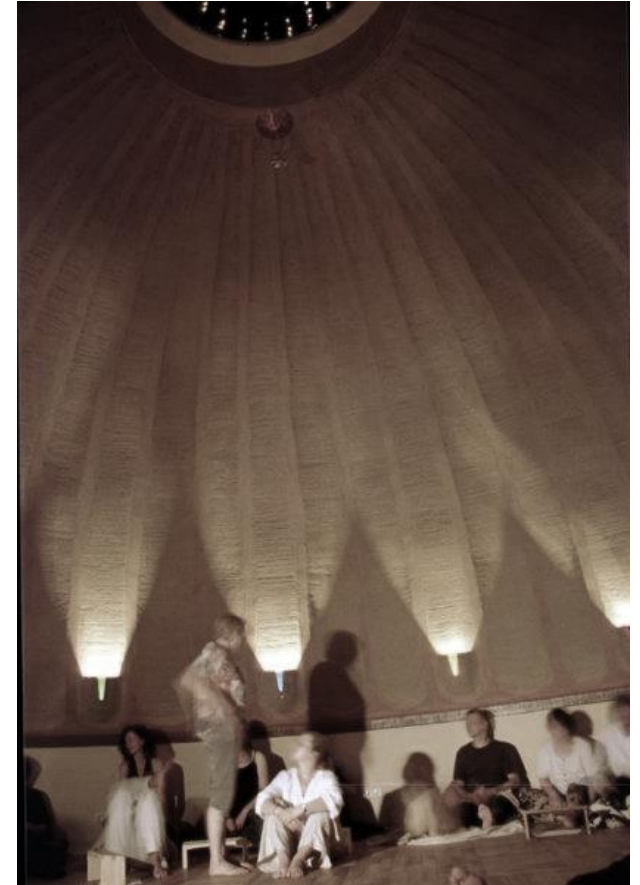
- PRESTACIONES COMO AISLANTE ACÚSTICO.

El sonido se transmite o se propaga mediante ondas, por lo que el aislamiento acústico tiene la función de proteger un determinado recinto contra la penetración de esas ondas sonoras procedentes normalmente del exterior, procurando que tanto el ruido aéreo como el ruido estructural no lleguen al receptor a través de fachadas, cubiertas, etc. Por lo tanto, los materiales que mejor se comportan como aislantes acústicos son aquellos que poseen las cualidades de absorber o reflejar la mayor parte de esas ondas sonoras incidentes.

Normalmente el aislamiento acústico tiene una relación directamente proporcional con la masa del elemento constructivo, esto quiere decir que cuanto mayor es la masa del elemento mayor es el aislamiento acústico. Pero si se utiliza un material de núcleo poroso como son los fardos de paja aplicándole dos capas de revoco, una por el interior y otra por el exterior, con la suficiente masa también se pueden obtener unas condiciones de aislamiento contra el ruido óptimas.

Ensayos realizados en Australia, en un estudio de música, sobre muros de fardos de paja con un espesor de 45 cm obtuvieron; con un nivel sonoro en el interior del edificio de 114 a 117 dB y en el exterior de 62 a 71 dB, en un espectro de frecuencias entre 500 y 10000 Hz. Lo que se traduce en una diferencia de nivel sonoro de entre 43 y 55 dB.¹⁵

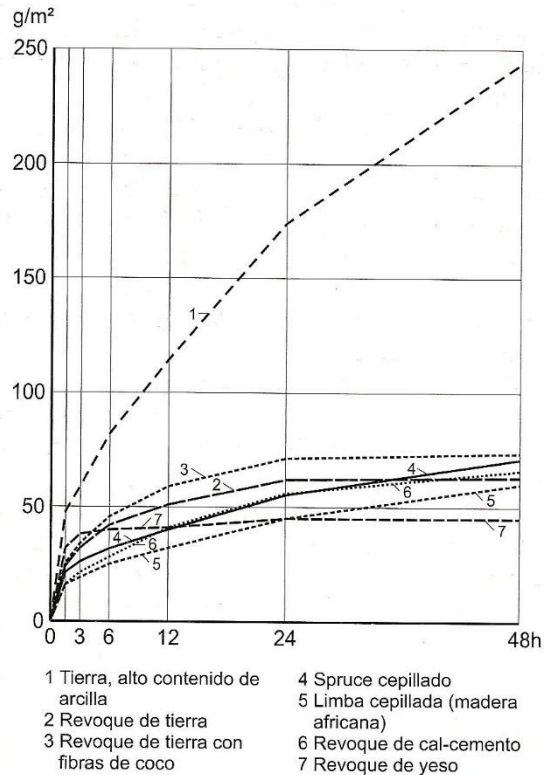
A la vista de los datos mencionados, se puede afirmar que las construcciones con fardos de paja ofrecen unas cualidades para el acondicionamiento acústico excelentes.



¹⁵ John Glassford en GraT. Haus der Zukunft y Wandsysteme aus nachwachsenden Rostoffen. Vienna, 2001.

³¹ Estudio de sonido. Forstmehren (Alemania). 2004. Gernot Minke.

• BENEFICIOS EN CUANTO AL CONFORT HIGROTÉRMICO.



El confort higrotérmico en el ámbito de la arquitectura se refiere a la sensación de bienestar o zona de confortabilidad que se suele relacionar con la psique humana, pero sus orígenes se encuentran en la física del ambiente que nos rodea, es decir, para que las personas puedan experimentar el confort higrotérmico se deben poder controlar las condiciones físicas de temperatura (temperatura seca en °C), humedad (humedad relativa en %) y el movimiento del aire (caudal de ventilación en m/s), de forma óptima y en función de la actividad a desarrollar en determinado espacio.

Es sabido que el cuerpo humano genera calor -energía calorífica- y que ésta se transfiere al ambiente que lo rodea, por lo que, si obtenemos un confort higrotérmico en dicho ambiente, los mecanismos fisiológicos termorreguladores del cuerpo humano no deberán intervenir. Cuando esto sucede se puede decir que estamos ante una termorregulación natural o lo que es lo mismo, estaremos en la zona de confortabilidad.

El ambiente interior de un edificio es la atmosfera de dicha edificación, este viene determinado por los métodos constructivos y los materiales elegidos. Estos van a establecer, en mayor o menor medida, el nivel de calidad de vida en el interior de la edificación y los efectos biológicos en sus ocupantes. Por tanto, cuando diseñamos un edificio, tan importante es una buena organización y distribución como fundamental es tener un alto nivel de confort, ya que esto va a influir directamente en el rendimiento, bienestar y salud de sus usuarios.

Según los parámetros que se definen en las cartas bioclimáticas y psicrométricas, los intervalos de valor que permiten el confort térmico son:

- Temperatura seca o del aire ambiente entre 18° y 26 °C.
- Humedad relativa entre 40 y 65 %.
- Caudal de ventilación entre 0 y 2 m/s.

³² Curvas de sorción de revocos de 21°C y con incremento de la humedad ambiente de 30% a 70%. Espesor de la prueba: 15 mm (Minke 2000).

3 | BENEFICIOS HUMANOS, ECOLÓGICOS Y CONSTRUCTIVOS DE LA CONSTRUCCIÓN CON PAJA

En esa búsqueda por obtener el confort higrotérmico en el ambiente interior de los edificios sostenibles, los materiales naturales son una excelente respuesta. Sobre todo si tenemos en cuenta la propiedad que todos ellos poseen; la transpirabilidad – capacidad que tiene un material para que el vapor de agua lo atraviese –, o lo que es lo mismo, la resistencia a la difusión del vapor de agua. Cuanto más transpirable menor resistencia a la difusión del vapor.

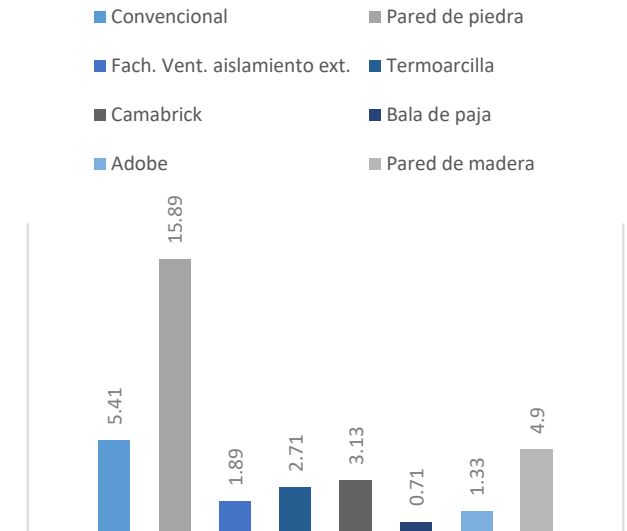
Esta propiedad permite mantener un flujo de humedad interior-externo hacia el equilibrio, así como, evitar las condensaciones en los muros. Como norma general se establece que el diseño óptimo de un muro se consigue reduciendo dicha resistencia a la difusión, capa a capa, desde dentro hacia fuera. Es decir, el revoco interior será menos permeable que el exterior.

La siguiente gráfica muestra los coeficientes de resistencia a la difusión del vapor de distintos materiales:

Como se puede observar en la gráfica, la paja es un material muy permeable a la difusión del vapor, por tanto, la función del revoco es de vital importancia si se quiere evitar el deterioro de las balas de paja. De esta manera, los fardos de paja irán debidamente protegidos por un revoco natural cuyo objetivo principal es el de mantener ese carácter permeable de la paja y así permitir que la edificación transpire. Lo más común es utilizar un revoco de mortero natural en varias capas, tanto para el interior como para el exterior, que puede ser de tierra arcillosa, de cal, de cal y arena, de arcilla y arena, de arcilla y cal y arena...incluso mortero de cemento, pero este no es muy recomendable por compatibilidad de materiales.

En definitiva, si se suman las cualidades de la paja como material de construcción a las cualidades reguladoras de la humedad relativa del ambiente que poseen los morteros de arcilla de forma natural, se pueden conseguir en el interior de las edificaciones unas condiciones excelentes de confort higrotérmico, ya que los propios muros se encargan de la renovación del aire consiguiendo, en el ambiente interior, un aire mucho más puro que el de otras edificaciones realizadas con otros materiales. Todo ello de forma natural y cumpliendo con los estándares de la bioconstrucción y la sostenibilidad.

RESISTENCIAS A LA DIFUSION



³³ Gráfica de resistencia a la difusión del vapor de agua de diferentes materiales de construcción

- PRESTACIONES DE RESISTENCIA AL FUEGO.



A pesar de las creencias que puedan existir entorno a las construcciones con paja y de saber que la paja es un material que tiene una combustibilidad muy alta, las construcciones hechas con fardos de paja tienen una resistencia bastante elevada al fuego. Esto se debe a dos motivos principalmente; la elevada compresión a la que están sometidos los fardos de paja que no permiten la suficiente presencia de oxígeno para que esta arda, y en segundo lugar a la elevada resistencia que ofrecen los revocos de tierra arcillosa.

Según investigaciones oficiales llevadas a cabo en Austria por el Instituto “*Versuchs – und Forschungsanstalt der Stadt Wien*” (MA 39-VFA), sobre fardos de paja con una densidad de 120 Kg/m^3 , según la normativa austriaca (ÖNORM B 3800). Se ensayó sobre una estructura de madera con cerramiento de fardos de paja, con un revoco interior de tierra y exterior de cal, ofreciendo unos resultados de resistencia al fuego de 90 minutos. Otro estudio realizado por la Red de Construcción con Paja alemana (FASBA) en el 2003, sobre muros de fardos de paja con un revoco de 3 cm de tierra arcillosa por ambas caras del muro, obtuvieron unos resultados iguales a los de Austria, con una clasificación F-90 según la normativa alemana DIN 4102-2.¹⁶



Estudios posteriores se han llevado a cabo en diferentes partes del mundo, y han obtenido unos resultados de resistencia al fuego mejorados. En el caso del ensayo realizado por el departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales (IDIEM) de la Universidad de Chile, sobre un muro de fardos de paja con una densidad aparente de entre 90 y 100 Kg/m^3 y un revoco – tanto interior como exterior – de tres capas con tierra arcillosa y otros agregados, alcanzaron unos resultados que superaban los 120 minutos con una clasificación F-120. Esto se debe al grosor del revoco, a mayor grosor mayor es la resistencia al fuego.

^{34, 35} Pruebas de resistencia contra el fuego.

¹⁶ Rikki Nitzkin y Maren Termens. “Casas de Paja” Una guía para autoconstructores. 2016.

Estos resultados se traducen en la capacidad que poseen dichos elementos constructivos para mantener sus características estructurales, de estabilidad y de aislamiento frente a una exposición continuada al fuego, expresada en minutos.

A la vista de los estudios y datos mencionados se puede afirmar que las construcciones con fardos de paja ofrecen unas altas prestaciones en cuanto a su comportamiento frente al fuego, demostrando que los fardos de paja pueden cumplir con las exigencias normativas que establecen los países y poder aplicar este material en la construcción de viviendas, edificios residenciales, escuelas, garajes y edificios agrícolas.

- PRESTACIONES ESTRUCTURALES.

El estudio de las capacidades estructurales de las balas de paja, se refiere, sobre todo, al uso de las balas de paja como elemento estructural en la construcción. Por tanto, se está aludiendo a la tipología constructiva de muros portantes o autoportantes donde las balas de paja ejercen el papel de elemento estructural, aislamiento y cerramiento. Puesto que en las otras tipologías constructivas la función portante recae sobre otros materiales, principalmente la madera.

A pesar de la cantidad de estudios y ensayos realizados por todo el mundo para establecer un comportamiento estructural unificado de los fardos de paja, no se han obtenido unos resultados claros, ya que, existen muchas variables que pueden modificar el resultado final. Desde la humedad que contiene la paja, la densidad, espesor y tipo de revoco, diseño, hasta la correcta ejecución de un muro, o el tipo de fardo que compone el muro, son variables que pueden alterar el comportamiento estructural de las balas de paja.

Tras varios años de ensayos realizados se ha establecido como norma general para todos los sistemas constructivos, una densidad de los fardos de paja siempre superior a los 90 Kg/m³. Cuanto mayor sea la compresión de los fardos mayor estabilidad y facilidad de ejecución de los muros.

En el caso de los muros portantes todos los estudios realizados han coincidido en que los fardos de paja si se colocan planos tienen mejor comportamiento a compresión que cuando se colocan de canto, que el tipo y espesor del recubrimiento es fundamental para la resistencia del muro, y la necesidad de un elemento perimetral sobre los muros que distribuyan las cargas centrándolas en el muro y repartiéndolas uniformemente. Todas estas características se atribuyen al sistema “Nebraska” que definiremos más adelante.

Centrándose en los aspectos estructurales de los fardos de paja, tras varios ensayos realizados en Alemania, el arquitecto Gernot Minke establece que los muros de balas de paja pueden soportar techos – cargas – de más de 500 Kg por metro lineal de muro, el equivalente a 1000 Kg/m², y que esta carga aún podría ser mayor.¹⁷

¹⁷ Gernot Minke. Friedemann Mahlke. “Manual de construcción con fardos de paja”. Pág.22.

Según la normativa californiana, el “Código de Fardos de Paja” permite una carga vertical de 1953 Kg/m² en la parte alta del muro,¹⁸ aunque para que los muros puedan soportar estas cargas, y posiblemente cargas mayores, es imprescindible la colaboración de elementos estabilizantes tanto horizontales como verticales, para evitar que los muros se curven o sufran cualquier tipo de pandeo, así como, para unir los fardos de paja que componen el muro y que estos puedan responder de forma conjunta ante las distintas sollicitaciones.

Otro factor importante a tener en cuenta es la deformación o aplastamiento de los fardos de paja cuando los muros entran en carga, por este motivo es tan importante que los fardos tengan una alta compresión (siempre superior a 90 Kg/m³). Según un estudio realizado por el arquitecto Gernot Minke en la Oficina Estatal de Pruebas de Materiales de Construcción de Tréveris, Alemania; se ensayó a compresión unos fardos de paja colocado horizontalmente con una densidad de 130 Kg/m³, se le aplicó una carga de 2000 Kg/m² que produjo un aplastamiento del 1,25 %. Y en una segunda prueba con una carga de 7100 Kg/m² su aplastamiento fue del 5 %. Lo que quiere decir que la compresión del fardo aumenta proporcionalmente con la carga y que la deformación que se produce es elástica, ya que al retirar la carga el fardo volvía a su estado inicial.¹⁹

A la vista de los datos mencionados se puede asegurar que los muros de fardos de paja aportan a las construcciones un grado elevado de protección antisísmica en comparación a otros materiales convencionales. Esto se debe a su flexibilidad y su capacidad de deformación elástica. Cualidades que hacen de este material una excelente respuesta para la construcción de edificaciones en zonas con riesgo de movimientos sísmicos.

¹⁸ Bruce King. “Buildings of Earth and Straw: Structural Design for Rammed Earth and Straw Bale Architecture”. Ecological Design Press. EE.UU. 1996.

¹⁹ Gernot Minke. Friedemann Mahlke. “Manual de construcción con fardos de paja”. Pág.22.



4. HISTORIA DE LA CONSTRUCCIÓN CON PAJA. PRIMERAS CONSTRUCCIONES.

La paja es uno de los materiales de construcción más antiguos que se conocen. Casi desde los inicios de las primeras civilizaciones, hace 10.000 años, en la antigua Mesopotamia y después en Egipto, las clases populares ya utilizaban la paja y el barro como materiales de construcción en la edificación de sus hogares.

Posiblemente el uso más evidente que se le ha dado a este material en su concepción tradicional haya sido para la construcción de cubiertas y techados vegetales. Un ejemplo claro de ello son los primeros asentamientos en el norte de la península ibérica, que datan de la Edad del Bronce, con construcciones de paredes de piedra y cubiertas de paja; haciendo uso de los materiales que ofrecía el lugar.

Como es sabido, el uso de la paja en la construcción no es nuevo, pero sí son relativamente recientes las construcciones de casas con fardos de paja. El inicio de la edificación de casas de fardos de paja se debe a la invención de las máquinas empacadoras a mediados del siglo XIX, en los Estados Unidos. En 1850 se inventó la primera empacadora manual, después en 1872 llegó la empacadora propulsada por caballos y en 1884 terminó llegando la de vapor.²⁰

Las primeras construcciones de casas con fardos de paja surgieron por la necesidad de las primeras familias de granjeros, asentados en la Grandes Planicies de Nebraska, de tener un lugar donde vivir y que fuese de construcción rápida y económica. La urgente necesidad y la falta de materiales tradicionales como la piedra y la madera, hizo que estos consideraran los bloques de paja la solución más inmediata para construir sus hogares. Surgió así la primera técnica constructiva con fardos de paja apilados formando muros de carga, que es conocida como “Técnica Nebraska”. La primera casa – documentada – construida con fardos de paja en las planicies de Nebraska fue en 1886, era una escuela de una única sala.

³⁶ Poblado cántabro en Cuna del Ebro.

³⁷ Poblado cántabro en Argüeso.

³⁸ Embaladora de paja.

²⁰ Rikki Nitzkin y Maren Termens. “Casas de Paja” Una guía para autoconstructores. 2016.

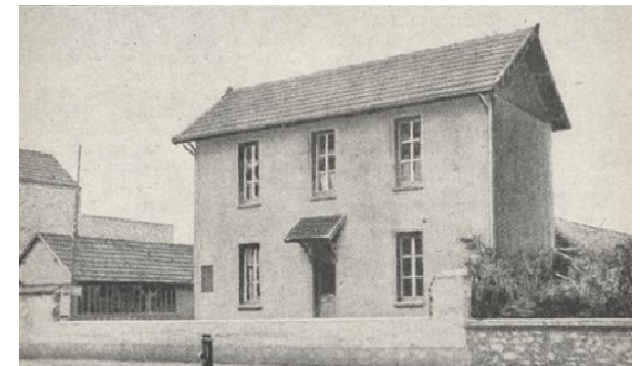
Lo que en un principio fue considerado como una solución temporal terminó estableciéndose como viviendas definitivas, cuando sus ocupantes descubrieron lo beneficioso de estas estructuras tales como; la confortabilidad térmica interior ante las temperaturas extremas en los inviernos y veranos de Nebraska, su durabilidad, la facilidad constructiva para trabajar con este material y lo económico que les salía levantar sus hogares, ya que era un material que abundaba.

Una vez descubiertas las cualidades de estas construcciones comenzaron a revestirlas para mayor durabilidad y fueron adoptadas como vivienda permanente. Las construcciones con fardos de paja más antiguas y que aún siguen en pie, algunas de ellas habitadas, datan de entre 1900 y 1914.²¹

Fue entre 1915 y 1940 cuando las construcciones con muros de fardos de paja portantes tuvieron una mayor divulgación, incluso se edificaron iglesias con esta técnica. Estos nuevos conocimientos constructivos pasaron de EE.UU. a Canadá, y de ahí llegaron a Europa donde la primera construcción con fardos de paja se realizó en Francia, en Montargis, 1921. La *“Maison Feuillette”* posiblemente sea la primera construcción con muros de paja de dos plantas²². Diseñada por el ingeniero Emile Feuillette, en la actualidad sigue en uso como sede del Centro Nacional para la Construcción con Paja de Francia.

A partir de 1940 debido a los avances que se produjeron en la industria, y el sector de la construcción que fue introduciendo nuevos materiales, hicieron que la paja como material de construcción cayera en desuso.

No fue hasta los años 70 y 80 del pasado siglo, que se editaron varias publicaciones en los Estados Unidos sobre las casas con fardos de paja, los que supusieron el “resurgimiento” de este tipo de construcciones. Uno de ellos fue el artículo de Roger Welsch en su libro *“Cobijo”* (1973), el cual sirvió para volver a ver las construcciones con fardos de paja como una opción constructiva ante tanto hormigón y tanto acero. Mucha gente volvió a experimentar con las balas de paja, pero no fue hasta 1992 cuando Judy Knox y Matts Myhrman fundaron y publicaron el primer número de *“The Last Straw”*, en Norteamérica; el primer periódico/revista especializado en la construcción con paja cuyo objetivo era la de publicar y divulgar toda la información posible acerca de estas construcciones.



²¹ Rikki Nitzkin y Maren Termens. *“Casas de Paja” Una guía para autoconstructores*. 2016.

²² Gernot Minke. Friedemann Mahlke. *“Manual de construcción con fardos de paja”*.

³⁹ Casa Burke. Nebraska (EEUU). 1903.

⁴⁰ Iglesia Pilgrim Holiness. Arthur, Nebraska (EEUU). 1928.

⁴¹ Casa Feuillette. Montargis (Francia). 1921.



Poco después en 1993, gracias al trabajo de esta pareja, tuvo lugar la primera conferencia internacional sobre construcción con fardos de paja en los Estados Unidos, este encuentro facilitó enormemente la difusión de este tipo de sistemas constructivos por todo el mundo. Tras este encuentro internacional comenzaron a impartirse talleres de aprendizaje de estas técnicas constructivas, los pioneros en su organización fueron Matts Myhrman, Judy Knox Bill, Athena Steen, David Eisenberg y Steve McDonald en Norteamérica; y en Europa fueron Rolf Brinkmann, Martin Oehlmann y Harald Wedig.²³

Gracias a ellos la construcción con paja se extendió rápidamente por todo el mundo; EE.UU., Canadá, Francia, Inglaterra, Holanda, Dinamarca, Austria y Australia, entre otros. Toda la información, publicaciones y trabajos han hecho de la construcción con paja un campo en continuo desarrollo, muchos países incluso tienen su propia normativa específica para construcciones con este material, y en muchos de ellos ya no solo se construyen pequeñas casitas de campo, esta forma de construcción se ha expandido a edificios públicos de grandes dimensiones. Un ejemplo significativo es el auditorio para la feria internacional de horticultura y jardinería “Floriade 2002”, en Holanda. Presumiblemente el edificio público más grande de Europa construido con balas de paja, por *Giesen Architectuur* y *Tom Rijken*.

En la actualidad se puede afirmar que la construcción con fardos de paja está presente en casi todos los continentes: Australia, Asia, África, Sudamérica, Norteamérica, Europa, etc. Existen organizaciones y asociaciones por todo el mundo que se encargan de la investigación y el desarrollo de las construcciones con paja, entre las más punteras de Europa podemos citar; FASBA (Asociación profesional de construcción con paja en Alemania), SBN StroBouw Nederland (Red holandesa), RFCP-Les Compailleurs (Red profesional de construcción con paja francesa), ASBN (Austrian Straw Bale Network), Hungría, Portugal, ArTUR (Eslovaquia), Straw Build (Reino Unido), Casa Cálida (Bélgica) y la RCP Red de Construcción con Paja (España).²⁴



⁴² Matts Myhrman y Judy Knox. Creadores “The Last Straw”.

⁴³ Auditorio. Exp. Floriade 2002.

⁴⁴ Logos principales asociaciones europeas const. con paja

²³ Gernot Minke. Friedemann Mahlke. “Manual de construcción con fardos de paja”.

²⁴ Rikki Nitzkin y Maren Termens. “Casas de Paja” Una guía para autoconstructores. 2016.

5. EVOLUCIÓN DE LA TÉCNICA – SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE MUROS CON FARDOS DE PAJA.

Para la construcción de muros con fardos de paja existen varias técnicas diferenciadas, estas se pueden organizar básicamente en tres grupos. El primero está formado por los muros de fardos de paja PORTANTES o AUTOPORTANTES en los que los propios fardos son los encargados de soportar las cargas de la cubierta. El segundo se conforma por los muros de paja NO PORTANTES a los que se les añade una estructura independiente para soportar las cargas; esta puede ser de madera, hormigón armado, acero u otros materiales, siendo las más utilizadas por compatibilidad de materiales las estructuras de madera.

Debido al continuo desarrollo y experimentación con este material surge un tercer grupo; los muros de fardos de paja MIXTOS o HÍBRIDOS en los que los fardos de paja se complementan con una estructura de madera para soportar las cargas.



⁴⁵ Bechter Georg. Strohhaus. Sistema portante.

⁴⁶ Haus D-P. Atelier Werner Schmidt. Sistema no portante.

⁴⁷ House-S. Architekten Scheicher. Sistema no portante.



5.1. MUROS DE FARDOS DE PAJA PORTANTES O AUTOPORTANTES. “TÉCNICA NEBRASKA”.

Se la conoce con este nombre ya que es la primera técnica que se utilizó para la construcción con fardos de paja y le toma el nombre al lugar de su nacimiento, Nebraska, Estados Unidos. Ubicación donde se registran las primeras construcciones con fardos de paja como elemento estructural, de finales del siglo XIX.

Esta técnica es la más “tradicional” y sencilla de todas las técnicas constructivas con paja, siendo la opción más recomendada para los autoconstructores debido a su sencillez y rapidez de ejecución, la baja necesidad de recursos y de mano de obra especializada, lo que favorece el voluntariado y el trabajo en grupo en proyectos compartidos. Dichas particularidades conllevan una notable reducción de los tiempos en obra y la consecuente bajada de costes de la misma.

La principal característica de este método con muros portantes de paja es que todas las cargas de forjados y cubiertas son soportadas por los muros de paja, sin ningún marco estructural. El entramado de fardos y la fuerza del revoco soportan todo el peso de la cubierta y transmiten esas cargas a la cimentación.

En este sistema constructivo es fundamental la calidad y buen estado de los fardos de paja, ya que serán los encargados de la estabilidad y resistencia de la edificación. Por ello es de vital importancia controlar el tipo de paja que utilizamos, el estado de los fardos de paja en cuanto al grado de humedad, la compresión de la misma y su regularidad dimensional. Estas condiciones facilitaran su colocación y la correcta ejecución en obra para garantizar la estabilidad de los muros.

Como hemos citado anteriormente la compresión de los fardos de paja es un aspecto fundamental en este sistema constructivo, esta no debe ser inferior a 90 Kg/m^3 , ya que los muros van a soportar todo el peso de la cubierta. Las paredes de fardos de paja bien compactados pueden soportar techos de más de 500 kg por metro lineal de muro, o lo que es lo mismo 1000 Kg/m^2 ²⁵ aunque existan normativas que permitan cargas mayores como es el “Código de Fardos de Paja” californiano que permite un máximo de 1953 Kg/m^2 .²⁶



⁴⁸ Sala polivalente circular. Sistema Nebraska.

⁴⁹ Casa con muros portantes. Sistema Nebraska.

⁵⁰ Fardos jumbo portantes. Georg Bechter.

²⁵ Rikki Nitzkin y Maren Termens. “Casas de Paja” Una guía para autoconstructores. 2016.

²⁶ Gernot Minke. Friedemann Mahlke. “Manual de construcción con fardos de paja”.

Además de la propia compresión del fardo para la correcta ejecución se deben disponer los fardos entramados a contrajunta y por hiladas. Una vez alcanzada la altura deseada del muro se coloca una viga o zuncho perimetral de remate lo que permite pretensar los muros de forma mecánica utilizando unos flejes interiores y exteriores que van a comprimir el muro y lo van a unir a la cimentación o sobre-cimentación para que trabajen de forma conjunta. Esto es conocido como “sistema de agarre”.

Una vez metido en carga el muro se puede proceder a la colocación de la cubierta, para ello la compresión del muro debe ser mayor que el peso que va a recibir de la cubierta, el cual va a ser acogido por el zuncho perimetral que se encargara de distribuir el peso de manera equitativa en todo el muro. Es imprescindible que el peso del tejado recaiga en el centro de los zunchos perimetrales (parte más resistente de los muros de paja) o bien estar repartidos por igual en todo el ancho del mismo, de lo contrario el muro podría perder su estabilidad.

Otro punto importante es la colocación de los marcos para huecos de ventanas y puertas que a la hora de diseñarlos se debe tener en cuenta la compresión que se va a ejercer sobre el muro y se debe dejar un espacio por encima o debajo del marco de ventana para que dicha compresión se pueda llevar a cabo sin deformar los marcos.

Una vez completados los muros y la cubierta, solo faltaría el acabado de los muros tanto interior como exterior. El revoco a ambos lados del muro le confiere mayor resistencia y protección de los fardos de paja. Los muros son muchos más resistentes cuando se les aplica el revoco que en su ausencia.

A pesar de las objeciones y temores de un elevado porcentaje de la sociedad con respecto a este tipo de construcciones, una casa de muros de fardos de paja portantes bien realizada y ejecutada puede ser muy resistente. Existen numerosos ejemplos que avalan la durabilidad de este tipo de edificaciones, como en Estados Unidos donde se encuentra la vivienda de muros portantes de paja habitable con más de 100 años de antigüedad.²⁷



²⁷ Gernot Minke. Friedemann Mahlke. “Manual de construcción con fardos de paja”.

⁵¹ Flejes comprimiendo muro.

⁵² Casa con muros portantes. Sistema Nebraska.

⁵³ Capas de revocos naturales.

ESTUDIO Y APLICACIONES DE LAS CONSTRUCCIONES CON FARDOS DE PAJA | BENEFICIOS DE LOS MATERIALES NATURALES



Actualmente existen miles de construcciones repartidas por todo el mundo, como en el reino unido donde la confianza en las características portantes de este material es tal, que hay numerosas edificaciones con dos o incluso tres plantas con estructura de muros portantes de paja, registradas y legalizadas. Ello también se debe a que cuentan con una normativa legal aplicable para este tipo de construcciones como también es el caso de Francia, Suiza, Austria, Dinamarca, Holanda, Estados Unidos, Australia y Canadá entre otros.

En nuestro país, a pesar de existir numerosas edificaciones con este sistema constructivo legalizadas, no se cuenta con normativa que se le pueda aplicar, ya que el código técnico de la edificación no considera los fardos de paja como elemento estructural.



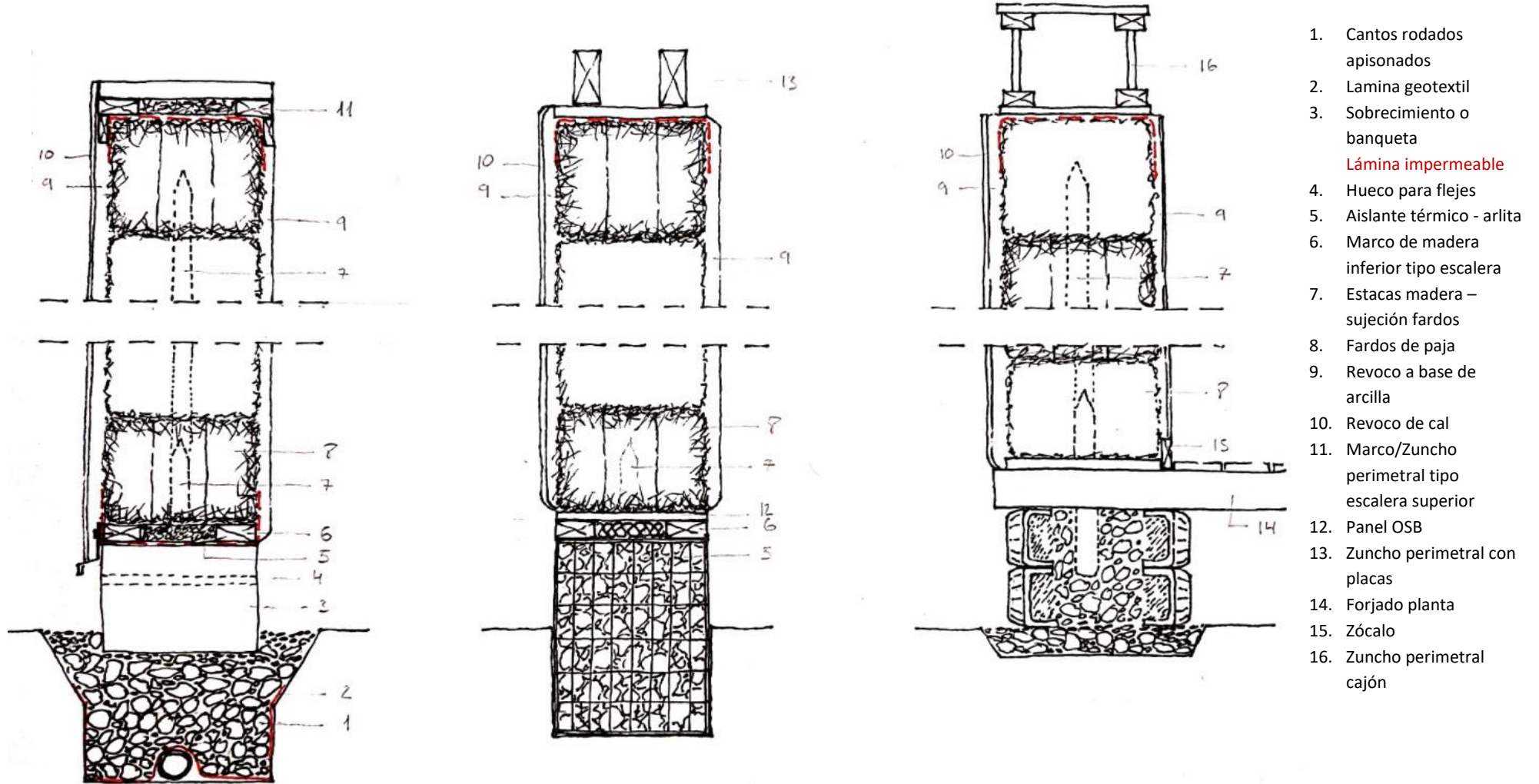
• LIMITACIONES DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO

- Altura máxima del muro en relación al espesor no debe de ser mayor de 5:1.
- Longitud máxima del muro portante en relación al espesor debe de ser menor de 13:1, de ser superior sería necesario preverse trabas adicionales.
- Los marcos de puertas y ventanas nunca deben ser más anchos que altos, ni colocarse en las esquinas.
- Las cargas del techo deben repartirse en al menos el 50% del espesor del muro de manera centrada.
- Los fardos deben de estar compactados a más de 90 Kg/m³.

⁵⁴ Proceso artístico para revocos naturales.

⁵⁵ Amazon Nails. Casa dos plantas. Sistema Nebraska.

DIFERENTES SOLUCIONES DE SISTEMA DE MUROS PORTANTES. TÉCNICA NEBRASKA.



56 Cimentación en zanja de grava con tubo drenante.

57 Cimiento y sobrecimiento a base de gaviones.

58 Banqueta a base de neumáticos con forjado suspendido.



5.2. MUROS DE FARDOS DE PAJA NO PORTANTES O DE RELLENO.

5.2.1. SISTEMA DE POSTES Y VIGAS.

El sistema constructivo de postes y vigas o muros de fardos de paja no portantes se caracteriza por tener una estructura de madera –generalmente– que se encarga de soportar las cargas de forjados y cubiertas. A diferencia del estilo “Nebraska”, los fardos solo tienen la función de cerramiento, terminación y aislamiento. Esta estructura puede ser de otros materiales resistentes como ladrillo, piedra, hormigón armado, estructura metálica, entre otros; pero, por compatibilidad en cuanto a comportamiento de materiales, la mejor elección es la madera por su bajo impacto ambiental y sus beneficios de salubridad.

En cuanto a los muros – no portantes, un aspecto fundamental es la unión de los fardos de paja a los elementos estructurales portantes para que estos puedan trabajar de forma conjunta, asegurando así la estabilidad del muro ante la incidencia de fuerzas horizontales como la del viento. Además de unir ambos elementos constructivos, el atado de los fardos permite la compresión de los mismos, condición imprescindible para conseguir explotar al máximo las prestaciones que ofrece este material.

Con este método constructivo, la estructura portante de madera requiere mayores conocimientos en el campo de carpintería y albañilería, por lo que esta tipología ya no es tan recomendable para la autoconstrucción. Una correcta ejecución y estabilidad de la estructura de madera precisa de los cálculos y el diseño de un profesional. Este sistema ofrece un amplio abanico de posibilidades en el diseño, ya que la combinación de la madera portante y la paja como cerramiento puede tener infinitas soluciones.

Dentro de ese amplio abanico de posibilidades se pueden diferenciar dos ramas de actuación. Por un lado, está el uso de una estructura portante de madera maciza de grandes dimensiones, y en segundo lugar está la opción de elegir perfiles de madera con menor tamaño en los cuales los fardos de paja colaboran en la estabilidad del muro.



⁵⁹ Casa de paja. La lama foundation. Postes y vigas exteriores.

⁶⁰ Autoconstrucción en Monleras. Postes y vigas interiores.

⁶¹ Arq. sin fronteras en Valladolid. Postes y vigas centrados.

La elección de unos elementos u otros dependerá del proyectista y del inversor que tendrán que valorar todos los factores que atañen al proyecto. Desde la disponibilidad de materiales, al presupuesto, los objetivos programáticos y funcionales, así como, los pros y los contras en cuanto a construcción y diseño.

En el caso de los elementos de madera de grandes dimensiones se transmite las cargas de forjados y cubiertas al suelo y los postes se pueden disponer empotrados en los muros, en la parte exterior de los mismos o en el interior.

La principal ventaja radica en una mayor libertad proyectual, puesto que estos elementos permiten mayores luces y por lo tanto espacios más amplios. Se pueden diseñar según consideraciones óptimas de diseño estructural sin depender de las limitaciones dimensionales de los fardos de paja. También ofrece mayor libertad a la hora de abrir huecos en los muros.

Como inconveniente hay que tener en cuenta que si se utilizan postes de grandes dimensiones separados del muro se debe prever un sistema de fijación que garantice la estabilidad del muro, así como su estanqueidad, lo cual supone un diseño y construcción más costosos para matizar este tipo de detalles. Además, no hay que olvidarse de la separación de los muros porque se pueden crear espacios residuales.

Otra ventaja es que si en el muro de fardos de paja se colocan los postes enrasados se forma una base para el revoco interior más firme, consiguiendo acabados de las paredes más perfectos además de la rigidez del elemento de madera para colgar mobiliario pesado de las paredes.

Si por el contrario se levantan estructuras de madera portantes con los fardos como relleno, se deben considerar las dimensiones de los fardos a la hora de colocar los pilares/postes, tanto para postes de grandes dimensiones como para los de menor tamaño. El diseño en ambos casos estará atado a las características dimensionales de los fardos de paja. Su mayor ventaja es la reducción de puentes térmicos y mayor estabilidad de los muros sin perder libertad para colocar las balas en otra posición que no sea plana. Las desventajas que tiene es una fabricación más laboriosa y, a la hora de dar el revoco, prever mallazo u otros materiales para un revestimiento continuo.



⁶² BAG Offinamobile y Paolo Robazza. Postes y vigas cajón.

⁶³ Construcción temporal La ciudad verde. Floriade

⁶⁴ Muros no portantes de relleno. Atelier Werner Schmidt.

ESTUDIO Y APLICACIONES DE LAS CONSTRUCCIONES CON FARDOS DE PAJA | BENEFICIOS DE LOS MATERIALES NATURALES



Para la opción de construir una estructura portante con postes de madera de menor tamaño, esta se diseñará en función a las medidas de los fardos, tanto en el ancho como en el largo. Esta opción consiste en colocar dos listones de perfil pequeño a modo de columnas, con el ancho o con el canto del fardo, y estas a su vez se cierran inferior y superiormente con otros dos listones a modo de zunchos que forman un cajón estructural, el cual se rellena con los fardos de paja a compresión y a modo de columna.

Este sistema ofrece mayor sencillez y flexibilidad constructiva, además de la ventaja de reducir el número de balas a emplear al mínimo. Otra ventaja es la facilidad para abrir huecos y ventanas al tener ya los marcos estructurales. La desventaja es que hace uso de mayor cantidad de madera que el sistema clásico de muros de fardos de paja no portantes.

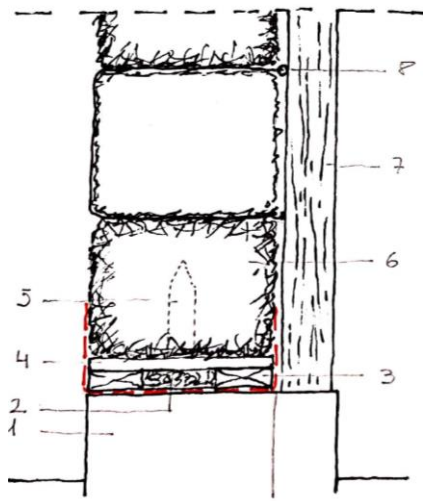
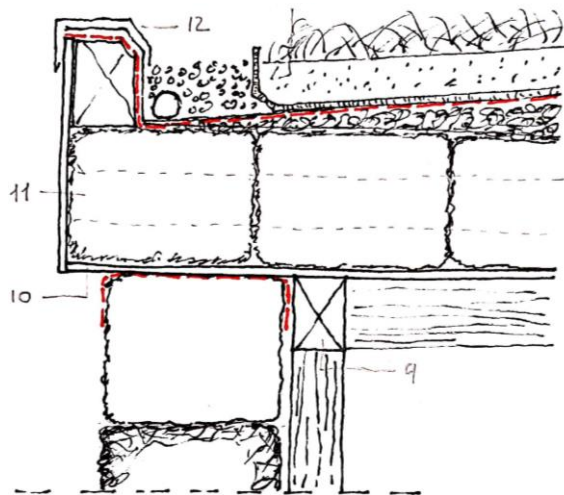


Este sistema es el germen de las tipologías constructivas que se van a comentar en los siguientes apartados, como pueden ser el sistema modular.

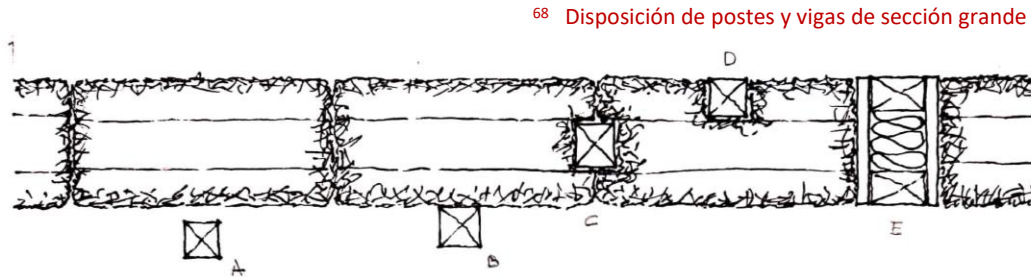
⁶⁵ Postes y vigas o de relleno. Atelier Werner Schmidt.

⁶⁶ Postes y vigas pequeñas. Instituto Español de Baubiologie.

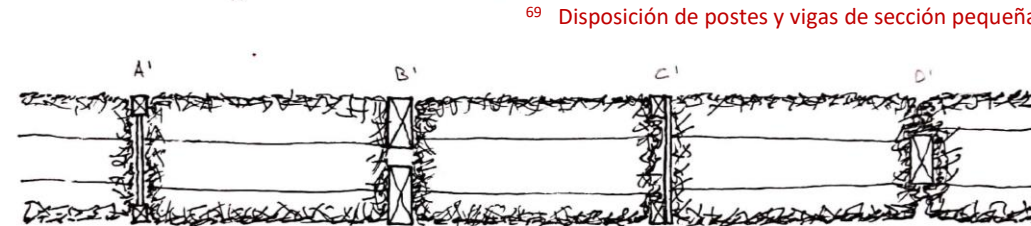
DIFERENTES SOLUCIONES DE SISTEMA DE MUROS NO PORTANTES DE POSTES Y VIGAS.



67 Sistema de poste desconectado

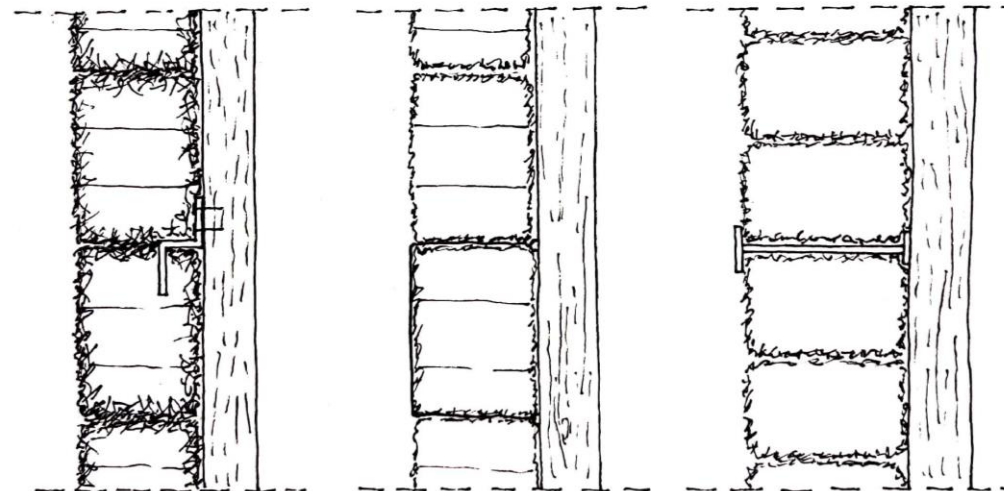


68 Disposición de postes y vigas de sección grande



69 Disposición de postes y vigas de sección pequeña

Fijación de fardos a postes de madera



70 Mediante plaquetas metalicas

71 Mediante ganchos y cables

72 Mediante anclaje de madera

1. Sobrecimiento o banqueta
 2. Aislamiento de arlita
 3. Marco inferior
 4. Panel OSB
 5. Estaca de madera
 6. Fardo de paja
 7. Poste o pilar desconectado
 8. Fijación de fardo de paja al muro
 9. Viga descentrada
 10. Panel OSB
 11. Forjado cubierta aislado con fardos
 12. Albardilla
 13. Cubierta ajardinada
-
- A. Poste descentrado del muro
 - B. Poste tocando el muro
 - C. Poste empotrado en el canto del muro
 - D. Poste enrasado
 - E. Postes cajón mismo ando del muro
-
- A'. Pilares doble T
 - B'. Pilares madera solida
 - C'. Pilares compuestos tipo escalera
 - D'. Pilar empotrado en el centro del muro



5.2.2. SISTEMA GREB.

La técnica GREB (Groupe de Recherces Écologiques de la Baie) nace en Quebec, Canadá. Es una pequeña aldea ecológica llamada The Bay. Es en 1988 cuando varias familias compran una parcela en estas tierras y deciden crear una ecoaldea en tierra agrícolas y de madera. El proyecto es encabezado por Pierre y Marie Thérèse, en una búsqueda por construir un mundo diferente comentan el porqué de su filosofía, en una entrevista publicada en “The Last Straw”.

“En 1972, The Rome Club enfatizo los límites de nuestra sociedad basados en un crecimiento infinito en un mundo de recursos limitados. No sabía si los recursos se extinguirían en 20 o 300 años... Pero era totalmente inaceptable para nosotros haber construido un sistema no viable a largo plazo, confiando además en la explotación de los países que se encuentran en el sur. Era nuestro deber encontrar soluciones para construir un mundo diferente...”²⁸



Con esta filosofía decidieron crear la pequeña ecoaldea The Bay, desarrollando la técnica GREB de construcción con paja, en apoyo a una vida más ecológica, social y económicamente viable.

En el transcurso de los años fueron llegando a esta ecoaldea muchas personas interesadas en el modo de vida planteada por estos dos pioneros y su sistema de bioconstrucción. Es el caso de Patrick Dery (profesor e investigador, dirige un centro de investigación sobre energías renovables) junto a Martin Simard que tras trabajar con el sistema planteado por los creadores de “The Bay” desarrollaron la “técnica GREB”. Estos se encargaron de su difusión por todo el mundo y de realizar numerosas investigaciones que la avalan.



⁷³ Ecoaldea de la baie. Canadá. Construcción GREB.

⁷⁴ Casa Dery. Quebec. Canadá. Construcción GREB.

⁷⁵ Fardo de paja entre entramado de madera.

²⁸ “The Last Straw”. Chloe Deleforge y Oliver Mitisieno, 2015

5 | EVOLUCIÓN DE LA TÉCNICA – SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE MUROS CON FARDOS DE PAJA

Este sistema consiste en la construcción de un entramado ligero de madera doble con listones de pequeña medida – 10x4 cm – que se disponen creando una cámara entre ellos que será ocupada por los fardos de paja, normalmente de canto. El hueco que queda entre las balas y la superficie de los listones (4cm) se rellenan mediante el vertido de un mortero ligero denominado GREB que tiene proporciones de: 1 cemento, 1 cal, 3 arena y 4 de serrín. Este vertido se va haciendo por hiladas de fardos de paja, colocando un encofrado de madera atornillada a los listones hasta la primera hilada, y rellenando el hueco entre fardos y encofrado con el mortero aligerado GREB. Una vez realizado el vertido del mortero, éste se vibra para que la mezcla se reparta homogéneamente, y se continúa con la siguiente hilada de fardos repitiendo el proceso hasta la terminación de los muros. Cuando el mortero ha fraguado se retira el encofrado atornillado a la estructura y los muros resultantes quedan perfectamente aplomados. Esta es una de las mayores ventajas de este sistema, ya que una vez retirado el encofrado de madera la planeidad de las superficies facilita el acabado final, que se puede realizar con revocos de todo tipo o utilizar otros materiales como puede ser la madera tanto al interior como al exterior.

Esta técnica como se ha mencionado posee muchas ventajas, pero tendría algunos inconvenientes respecto a otros sistemas. Hace uso del cemento, aunque sea un porcentaje mínimo del 11%, y de mayor cantidad de madera, lo que todo esto supondría un aumento del coste económico con respecto a otras técnicas.



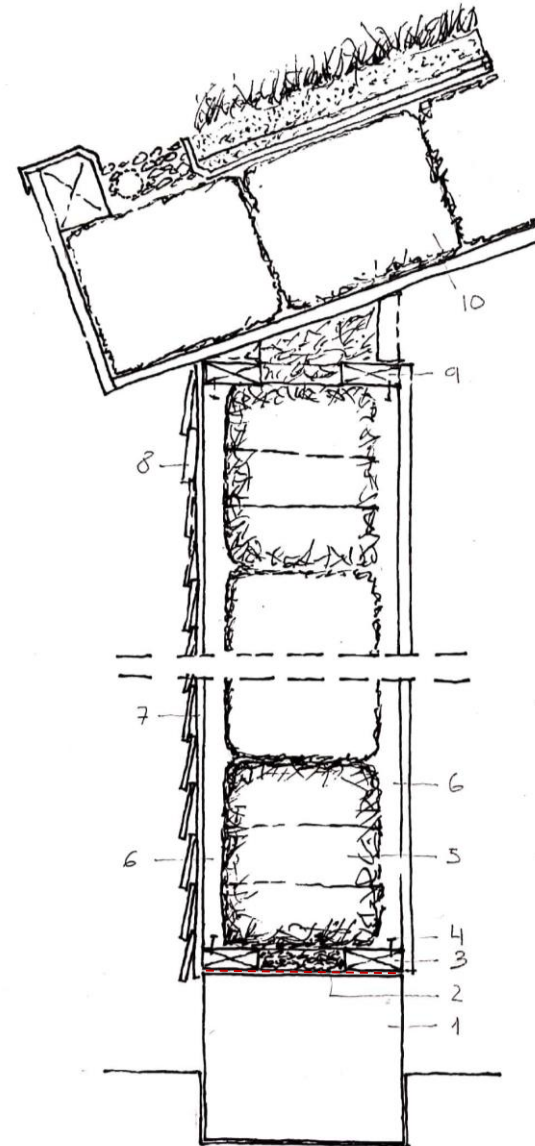
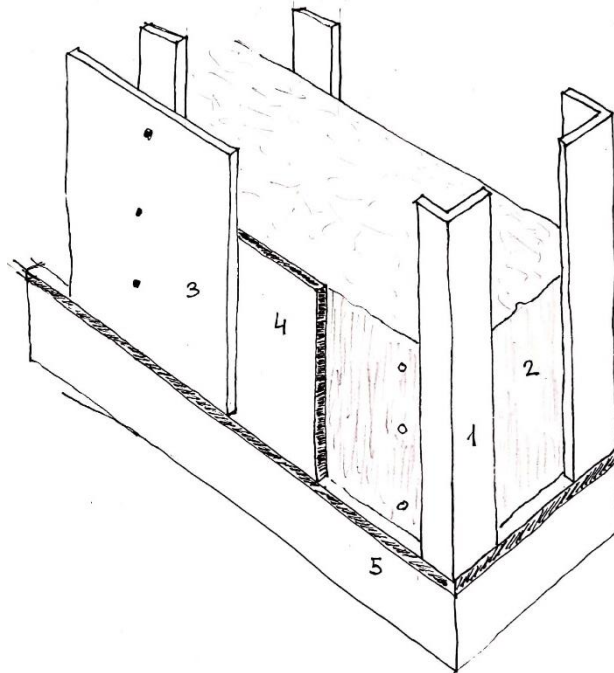
⁷⁶ Detalle en esquina. Construcción GREB.

⁷⁷ Encofrado y mortero del muro GREB.

⁷⁸ Julio Tamata. Construcción GREB.

SOLUCIÓN DE SISTEMA DE MUROS NO PORTANTES GREB

1. Sobrecimiento o banqueta
2. Aislamiento de arlita
3. Marco inferior
4. Clavo de agarre
5. Fardo de paja
6. Mortero GREB
7. Montante de madera
8. Acabado de madera
9. Marco superior
10. Forjado cubierta aislado con fardos



79 Sistema GREB

5.3. MUROS DE FARDOS DE PAJA MIXTOS.

5.3.1. SISTEMA CUT (CÉLULAS BAJO TENSIÓN).

Este sistema constructivo con fardos de paja surge del trabajo y experiencia de su creador Tom Rijven, quien lo bautizo como Técnica CUT, siglas provenientes del inglés “Cell Under Tension” y en castellano conocido como “Células Bajo Tensión”. La técnica CUT es la combinación de la técnica Nebraska y el sistema de postes y vigas, o mejor dicho, el entramado de madera tradicional de la construcción francesa. Explotando lo mejor de cada una de ellas, aprovecha la capacidad portante que poseen los fardos de paja bien comprimidos – Nebraska – para reducir el tamaño del entramado de madera y, de esta manera, estos dos elementos constructivos trabajan del como uno en la resistencia y estabilidad ante las distintas sollicitaciones de una edificación. A estos dos materiales combinados hay que sumarlos el revestimiento, que también es un elemento fundamental para la capacidad estructural de los muros.

Este sistema se fundamenta en leyes básicas de la mecánica (acción – reacción). Al comprimir los fardos de paja o “células” se generan unas tensiones en el interior de estas, que al embutirlos en el entramado de madera y soltando las cuerdas que comprimen los fardos una vez colocados, dichas tensiones se liberan en las tres direcciones posibles – superior, inferior y lateralmente – generando un sistema estable con el uso de una cantidad mínima de material posible.

Para ello es fundamental la disposición de los montantes verticales de madera, que debe ser unos 5 cm menor que el largo del fardo ya comprimido, creando así una compresión horizontal adicional que permite la estabilización de los montantes verticales, evitando el pandeo al recibir la misma presión por ambas caras cuando se cortan las cuerdas que comprimen los fardos. Esta disposición de los elementos a modo “sándwich” permite reducir el espesor de los montantes de madera hasta los 3 cm pudiendo soportar las cargas que va a recibir de forjados o cubiertas, dimensiones mínimas que serían inviables utilizando otros sistemas constructivos.



⁸⁰ Hajo Schilperoort. Haaren. Colocación fardos. Técnica CUT.

⁸¹ Casa Steensel. Exterior. Técnica CUT.

⁸² Hajo Schilperoort. Haaren. Montantes verticales.



Antes de cortar las cuerdas de los fardos, una vez dispuestos entre los montantes, se deben solucionar las tensiones verticales, para ello, se colocan dos listones de madera de 2,5 x 3,5 cm encajados en el fardo, uno a cada lado del montante vertical. Llegados a esta situación comprimen los listones sobre los fardos, para mantener la tensión vertical, mientras se atan los listones a los montantes mediante tornillos. Una vez llegados a este punto, en el que montantes y listones han quedado arriostrados y los fardos tensionados vertical y horizontalmente, se pueden cortar las cuerdas que comprimen los fardos haciendo que todo el sistema se estabilice. Este proceso se lleva a cabo por hiladas hasta alcanzar la altura de muro deseada.



Otro aspecto fundamental de este sistema y del cual depende directamente la calidad del revoco final, es la aplicación de una capa de imprimación o prerrevoco a base de barbotina (una mezcla de arcilla y agua que debe ser lo más líquida posible manteniendo la consistencia). Lo ideal sería aplicar ésta antes de la colocación de los fardos en los muros y que penetre de 3 a 5 cm hacia el interior del fardo. Tom Rijven lo define en su libro *“Entre Paja y Tierra”* como *“la técnica del chapuzón francés”*. Este proceso se debe llevar a cabo un día antes de empezar a colocar los fardos de paja en el entramado de madera para dar tiempo a la barbotina de que seque antes de ejecutar los muros. Esta imprimación también se puede aplicar después de la ejecución de los muros, aunque ello conllevaría un proceso más laborioso.



Una vez ejecutados/levantados los muros, antes de aplicar las distintas capas del revoco, si han quedado huecos entre los fardos o en los encuentros entre madera y paja, estos se rellenan con una mezcla de barbotina y fibras de paja. Cuando se han sellado todas las juntas se procede con la capa base. Esta primera capa, que será de un grosor medio de 2,5 o 3 cm, formará un todo estructural unificando todos los fardos entre sí. Además de dotarlo de la nivelación a la superficie del muro y de la suficiente consistencia para poder aplicar las capas de acabado, ésta funciona como masa térmica aportando las cualidades citadas en el apartado anterior. La capa base se forma con una mezcla de barbotina espesa, fibras de paja pequeñas, arena, serrín o virutas de madera y un líquido fermentante. Todo ello mezclado con agua hasta obtener la consistencia deseada.

⁸³ Hajo Schilperoort. Haaren. Zuncho perimetral. Técnica CUT.

⁸⁴ Hajo Schilperoort. Haaren. Listones tensión vertical.

⁸⁵ Casa Steensel. Acabado interior. Técnica CUT.

La última capa de acabado tendrá un espesor de 1,5 cm y estará compuesta por una mezcla de arcilla, arena, agua y queso blanco, que al fermentar proporcionará la suficiente consistencia a la mezcla, con distintas dosificaciones de cada componente.

Una vez aplicada la última capa se procederá a su impermeabilización mediante la pulverización de un fijador de silicato potásico, que además de crear una película protectora del acabado, permite al muro seguir transpirando.²⁹

Como se ha mencionado en la descripción de esta técnica, se puede realizar una edificación respetuosa con el medioambiente y de impacto nulo, ya que todas las fases de ejecución se pueden realizar con materiales naturales, siendo esta la principal cualidad de este sistema.

Otra cualidad es la capacidad portante que ofrece al combinar la paja con la madera y el barro. Estudios realizados en el Instituto Universitario de Grenoble 1 (IUT1), el entramado de madera de perfil pequeño junto con los fardos puede soportar unas cargas de 4 To/ml, pero si se añaden las correspondientes capas de recovo con los espesores citados, los muros llegan a soportar hasta 12 To/ml.³⁰

Este sistema fue el elegido para la construcción del edificio público con fardos de paja más grande de Europa, en la Feria Internacional de horticultura y jardinería, Floriade 2002, en Holanda. El mismo Tom Rijven llevó a cabo el proyecto junto al arquitecto Giesen Architectuur. Este edificio fue realizado con fardos de paja “jumbo” con dimensiones mayores alcanzando los 2,5 m de longitud.



²⁹ Tom Rijven. “Entre paja y tierra”.

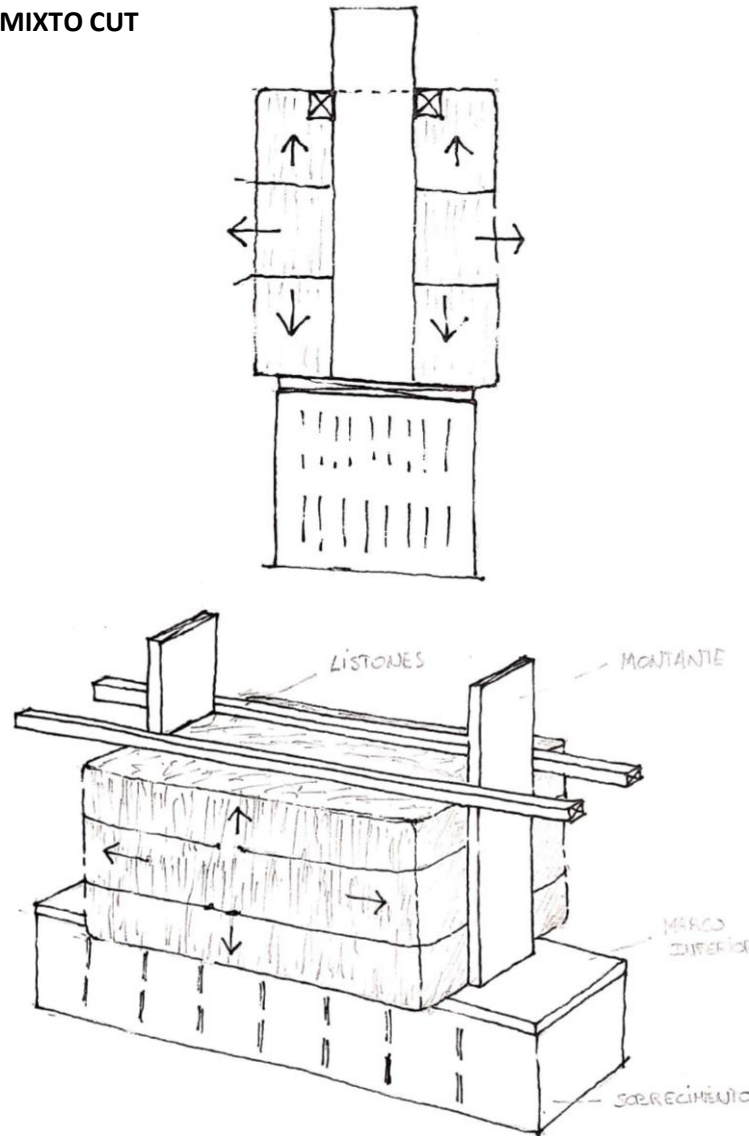
³⁰ Rikki Nitzkin y Maren Termens. “Casas de Paja” Una guía para autoconstructores. 2016.

⁸⁶ Ingredientes revoco arcilla. Técnica CUT.

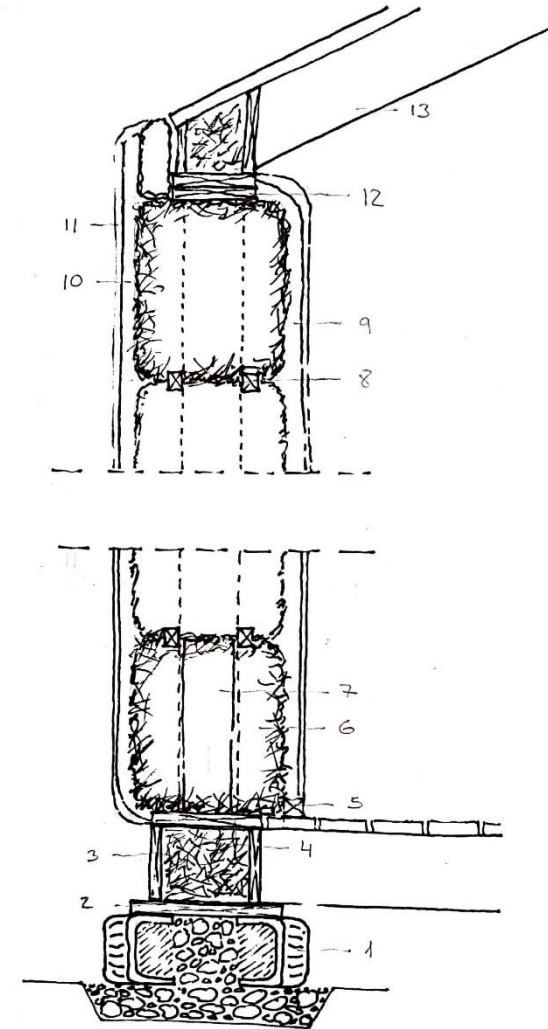
⁸⁷ Floriade 2002. Tom rijven y Giesen Architecten. Técnica CUT.

SOLUCIÓN DE SISTEMA DE MUROS MIXTO CUT

1. Banqueta a base de neumáticos
2. Panel OSB apoyo
3. Viga cajón
4. Marco inferior
5. Zócalo
6. Fardo de paja
7. Montante de madera
8. Travesaño de madera
9. Capa base
10. Revoco de barbotina
11. Capa de acabado
12. Marco superior
13. Forjado cubierta



88 Esquema distribución de tensiones cuando se cortan las cuerdas de los fardos



89 Sistema CUT

5.3.2. SISTEMA PREFABRICADO MODULAR.

El sistema prefabricado modular es la última técnica en aparecer dentro del amplio abanico de posibilidades de la construcción con paja, fruto del desarrollo e investigaciones realizadas hasta nuestros días con este material.

Estos módulos prefabricados cuentan con la ventaja del control de calidad de producto que debe superar cualquier material industrial antes de comercializarse, por lo que todas las características técnicas que ofrece este material junto con la madera se explotan al máximo.

Por el contrario, el único peso de este sistema prefabricado, como cualquier otro material que necesita de un proceso industrial, es el impacto que este proceso de industrialización puede suponer al medio ambiente en cuanto a consumo energético y emisiones de CO₂ a la atmósfera que dicho proceso conlleva. Pero teniendo en cuenta las cualidades, tanto de la paja como de la madera mencionadas anteriormente, posiblemente la prefabricación de estos módulos constructivos seguirá teniendo un impacto medioambiental mucho menor que otros materiales de construcción.

Centrándose en el campo del diseño y la construcción, ya existen muchos tipos y formatos de estos módulos prefabricados. Estos sistemas ofrecen una amplia gama de opciones en cuanto al diseño pudiendo elaborarse multitud de piezas modulares diversas en función de los requerimientos estructurales. Todo esto añadido a las innegables cualidades de la paja como material de construcción, en cuanto a aislamiento térmico, comportamiento higrotérmico y aislamiento acústico, hacen de este sistema una verdadera alternativa frente a sistemas constructivos convencionales.

El sistema de módulos prefabricados de paja con estructura portante de madera, tiene las ventajas constructivas de la fabricación; la rapidez de montaje “in situ”, la calidad de acabados³¹, el perfeccionamiento, la seguridad en obra y la facilidad de realizar un proyecto a en cuanto elaborar presupuestos, tiempos, etc.



³¹ Gernot Minke. Friedemann Mahlke. “Manual de construcción con fardos de paja”.

⁹⁰ Casa biológica. Een til Een. Técnica prefabricada modular.

⁹¹ Ecocon. Características físicas de panel de paja.

⁹² Puesta en obra módulos. Mano especializada ecocon.



Como se ha descrito anteriormente a lo largo de este trabajo, el hecho de utilizar materiales y productos prefabricados o industrializados seguramente va a conllevar la necesidad de mano de obra especializada, maquinaria, etc. Lo cual supone la pérdida del aspecto más socializador que llevan implícito el resto de técnicas constructivas. Esta es una de las principales desventajas de este sistema.

A continuación, se mencionan algunos fabricantes de estos sistemas prefabricados y como cada uno de ellos ofrece unas u otras características modulares o de tipos de paneles que es donde radica el principal inconveniente de esta técnica constructiva, en cuanto al condicionamiento del diseño a los módulos que cada fabricante produce.

Entre los principales fabricantes se encuentran Modcell (Gran Bretaña), Panel Ecococon (España), Ecopaja (España) o Bala Box (España), entre otros.



⁹³ Fabricación manual en taller prefabricado modulares.

⁹⁴ Amsterdam. Noord Schmid. Prefabricado urbano.

5.4. SISTEMA WRAPPING O DE FORRADO

En la actualidad con los nuevos cambios de normativas en post de la eficiencia energética y reducir el consumo energético de edificios en cuanto al gasto en calefacción y refrigeración cada vez se opta más por la solución de forrar los edificios con aislamiento térmico.

En este contexto, el uso de los fardos de paja para el “Wrapping” o forrado de edificios ya existentes se presenta como una alternativa factible ante la nueva situación actual del sector de la edificación.

Para las edificaciones viejas y nuevas con una carencia de aislamiento térmico se añade una capa suplementaria de fardos de paja por el exterior que permite forrarlos, aislarlos y remodelar las fachadas reconvirtiéndolas en edificios más sostenibles. Esta solución ayudará a reducir el consumo energético disminuyendo la necesidad de calefacción, mejorará las condiciones interiores ambientales y el coste del material no será muy elevado.

Las soluciones para llevar a cabo el forraje de muros son muy variadas, desde soluciones de atado de los fardos de paja directamente a las paredes hasta la colocación de subestructuras de madera para la sujeción de los mismos.

Sin embargo, la aplicación de esta solución constructiva conllevará a mayor cuidado a la hora de resolver el edificio de este sistema.

Antes de adoptar este sistema y las diversas soluciones que ofrece se debe tener en cuenta si requiere una ampliación del alero de la cubierta, si sería necesario ampliar la cimentación o realizar una nueva sobrecimentación, la disposición de marcos más amplios en ventanas y puertas, etc. Al igual que en otras técnicas constructivas, sigue siendo importante la protección de la paja frente a la humedad, ya sea por conducción, por lluvias o por filtraciones. Así como el cuidado de la compresión correcta del muro para que no exista la posibilidad de que aparezcan puentes térmicos que mermen la eficacia de las cualidades aislantes de esta solución constructiva.



⁹⁵ Acabado panel fibras de madera. Sistema Wrapping.

⁹⁶ Fardos atados a muro. Sistema Wrapping.

⁹⁷ Remate hueco ventana. Sistema Wrapping.

6. CONCLUSIÓN.

La construcción empleando la paja no es algo nuevo, ya que se lleva utilizando desde antes de las primeras civilizaciones junto con la madera y el barro. Aunque también es cierto que este nunca fue considerado un material noble, resistente y durable, posiblemente por sus condiciones como fibra natural. Aun así este material se ha seguido utilizando en construcción a lo largo de los siglos.

Con la llegada de la era industrial, el desarrollo de la fabricación en serie y la aparición de nuevos materiales como el acero y el hormigón, fueron condicionantes suficientes para relegar a la paja como material de construcción a un segundo plano.

Con la invención de la embaladora de vapor en 1.884, se reinventaron las características de este material, dotándolo con unas cualidades que hasta entonces no poseía.

Como se ha estudiado a lo largo de este documento, la construcción con paja parece haberse preparado para resurgir en la que se puede considerar como la “era climática”.

Por tanto, debido al desarrollo y las mejoras de las técnicas constructivas con paja, su baja huella ambiental, en comparación a las técnicas convencionales, nos hacen suponer que en los próximos años este material va a cobrar gran importancia en el futuro de la construcción sostenible.

7. BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFIA EN PAPEL

- GERNOT MINKE. FRIEDEMANN MAHLKE. “Manual de Construcción con fardos de Paja”. 2006
- RIKKI NITZKIN y MAREN TERMENS. “Casas de Paja. Una guía para autoconstructores”. 2016
- TOM RIJVEN. “Entre Paja y Tierra. Célula Bajo Tensión (CUT) para autoconstructores”.
- HON WILLIAM BROWNING, CATHERINE RYAN Y JOSEPH CLANCY. “14 Patrones de Diseño Biofílico. Mejorando la salud y el bienestar en el entorno construido”. Terrapin bright green
- AMAZON NAILS. “Information Guide to Straw Bale Building. For self-builders and the construction industry”. 2001
- BARBARA JONES. AMAZON NAILS. Traducción y edición: Rikki Nitzkin y Maren Termens. “Una Guía de Construcción con Balas de Paja”

BIBLIOGRAFIA WEB

- <http://gernotminke.gernotminke.de/> (18/05/2019)
- <https://www.terrapinbrightgreen.com/report/14-patrones-es/> (18/05/2019)
- <https://www.casasdepaja.org/> (08/06/2019)
- <https://tallerkaruna.org/> (08/06/2019)
- <https://www.casasdepaja.org/> (08/06/2019)
- https://www.cuerpomente.com/salud-natural/terapias-naturales/biofilia-efecto-terapeutico-naturaleza_1873 (15/06/2019)
- <https://fasba.de/> (09/07/2019)
- <http://construccionconfardosdepaja.cl/> (09/07/2019)
- <https://www.unr.edu/cceer/projects/straw-house> (10/07/2019)
- <http://www.promopaglia.it/> (16/07/2019)
- <https://webstore.iea.org/> (16/07/2019)
- <http://www.domoterra.es/blog/nader-khalili/> (16/07/2019)
- <http://dev.approchepaille.fr/> (23/07/2019)
- <http://baubiologie.at/strohballenbau/> (23/07/2019)
- <https://enpositivo.com/2009/12/expertos-en-la-evolucion-del-clima/> (11/08/2019)
- <https://arquitectutecnica.com/2013/06/17/que-es-la-bioconstruccion/> (11/08/2019)
- <http://www.interempresas.net/Madera/Articulos/51140-La-madera-y-la-eficiencia-energetica.html> (24/08/2019)
- <https://thelaststraw.org/> (25/08/2019)
- <https://strobouw.nl/project/floriade-2002-rabobank/> (27/08/20019)
- <https://arquitecturaorganica.es/la-importancia-de-la-transpirabilidad-en-los-materiales-de-construccion/> (27/08/2019)
- <https://www.mirencaballerobioestudio.com/confort-en-arquitectura/> (27/08/2019)
- <http://www.hildebrandt.cl/elementos-que-definen-el-confort-higrotermico-en-un-edificio/> (27/08/2019)

- <https://www.visuaestudio.com/la-paja-como-material-ecologico-alternativo-para-construir-edificios> (28/08/2019)
- <https://www.mirencaballerobioestudio.com/confort-en-arquitectura/> (28/08/2019)
- <http://bala-box.com/> (28/08/2019)
- <https://www.okambuva.coop/> (29/08/2019)
- <https://inarquia.es/casas-paja-ecologicas-sistemas-constructivos-ejemplos> (29/08/2019)
- <https://www.modcell.com/> (01/09/2019)
- https://issuu.com/universidadelbosque/docs/bios_ethos_vol13 (01/09/2019)
- <https://www.ecococon.lt/spanish/> (05/09/2019)

LISTA DE ILUSTRACIONES

- ¹ Relación de arquitectura con paja y naturaleza. Swalmen. Fuente: <https://strobouw.nl/project/swalmen/>
- ² Cabaña primitiva de Vitruvio. Fuente: <http://arquitecturaverdetics.blogspot.com/2015/05/historia-arquitectonica-cabana-primitiva.html>
- ³ Greensward Plan 33. Frederick Law Olmsted. Fuente: <https://www.nycgovparks.org/about/history/olmsted-parks>
- ⁴ Cabaña Walden Pond. Henry David Thoreau. Fuente: <https://yilasp771curso.wordpress.com/>
- ⁵ Fallingwater "La Casa Cascada". Frank Lloyd Wright. Fuente: <http://viajes.elpais.com.uy/2017/07/11/la-casa-de-la-cascada/>
- ⁶ Pabellón de Barcelona. Mies Van Der Rohe. Fuente: <https://www.laventanadelarte.es/centro/pabellon-mies-van-der-rohe/catalunya/barcelona>
- ⁷ Casa Farnsworth. Mies Van Der Rohe. Fuente: <https://www.curbed.com/2017/2/6/14522740/jeff-bridges-maggie-gyllenhaal-mies-van-der-rohe-farnsworth-house-movie>
- ⁸ La Cité Radiant. Le Corbusier. Fuente: <https://thecharnelhouse.org/2014/06/03/le-corbusiers-contemporary-city-1925/>
- ⁹ Campamento Ojibwe. Fuente: <https://www.blythcreekmaplefarm.com/apps/blog/show/43813700-ojibwa-making-maple-sugar>
- ¹⁰ Sociedad actual. Fuente: <https://www.allianz-assistance.es/blog/viajes/las-10-ciudades-mas-pobladas-del-mundo/>
- ¹¹ Gráficas de consumo energético y emisiones de CO₂ en el sector de la edificación. 2018. Fuente: <https://www.unenvironment.org/resources/report/global-status-report-2018>
- ¹² Esquema de prestaciones de la bioconstrucción. Fuente: <https://centrohuellas.wordpress.com/2016/03/28/arquitectura-sustentable-y-bio-construccion/>
- ¹³ Construcción de superadobe. Fuente: <https://www.calearth.org/alumni-projects2/>
- ¹⁴ Construcción con bambú. Great Wall House. Fuente: <https://kkaa.co.jp/works/architecture/great-bamboo-wall/>
- ¹⁵ Construcción con fardos de paja. Fuente: <http://www.imbermejo.es/blog/nuevas-tecnicas-de-construccion-ecologica-balas-de-paja-y-pellets/>
- ¹⁶ Cultivo de paja en todo el mundo. Fuente: <http://blog.cropti.com/cereales-granos-produccion-mundo/>
- ¹⁷ Campo con paja embalada. Fuente: <https://marioelias.es/pacas-de-paja-heno/>
- ¹⁸ Quema de paja sobrante. Fuente: <https://www.sextanoticias.cl/cientificos-de-la-region-buscan-erradicar-las-quemas-agricolas/>
- ¹⁹ Embaladora de paja. Fuente: <http://www.magussa.com.mx/page/es/equipo-forrajero/empacadoras-rectangulares/serie-300/348/>
- ²⁰ Recogida para transporte. Fuente: <https://www.soberaniaalimentaria.info/numeros-publicados/64-numero-33/586-cuando-transformar-un-cultivo-es-transformar-la-sociedad>
- ²¹ Descarga en obra. Fuente: <http://cansantosh.blogspot.com/2008/10/consiguiendo-pacas-de-paja.html>
- ^{22, 23} Construcciones con paja. Voluntarios. Fuente: <https://www.strawbale.com/photo-gallery-straw-bale-workshops/> <http://www.cobijonatural.com/galerias/galerias-formacion/>
- ²⁴ Construcción bóvedas de paja. Gernot Minke. Fuente: <http://minke-strawbale.blogspot.com/2010/08/6th-day.html>

- ²⁵ Estructura de materiales naturales. Madera. Fuente: <https://construccionbalasdepajauax.wordpress.com/tag/paja/>
- ²⁶ Mezcla tierra y paja para revoco. Rafael Sala Nowotny. Fuente: <http://rafaelsala.es/en-construccion-casa-de-paja-en-inca-v/>
- ²⁷ Casa de fardos de paja aplicando el revoco. Fuente: <http://rafaelsala.es/en-construccion-casa-de-paja-en-inca-v/>
- ²⁸ Gráfica de transmitancias térmicas de diferentes materiales de construcción. Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Grafica-de-transmitancia-termica-de-diferentes-materiales-expresada-en-W-m2k-Fuente_fig4_329427939
- ^{29,30} Aula seminario. Universidad Kassel (Alemania). 2000. Gernot Minke y Friedemann Mahlke. Fuente: <http://gernotminke.gernotminke.de/projects/>
- ³¹ Estudio de sonido. Forstmehren (Alemania). 2004. Gernot Minke. Fuente: <http://gernotminke.gernotminke.de/projects/>
- ³² Curvas de sorción de revoques de 21°C y con incremento de la humedad ambiente de 30% a 70%. Espesor de la prueba: 15 mm (Minke 2000). Fuente: GERNOT MINKE. FRIEDEMANN MAHLKE. "Manual de Construcción con fardos de Paja". 2006
- ³³ Gráfica de resistencia a la difusión del vapor de agua de diferentes materiales de construcción. Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Asi-tambien-su-transpirabilidad-Fuente-Revista-Ecohabitar_fig5_329427939
- ^{34,35} Pruebas de resistencia contra el fuego. Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=D3O1KJM8mLs>
- ³⁶ Poblado cántabro en Cuna del Ebro. Fuente: <https://www.escapadarural.com/blog/como-hace-2-000-anos/>
- ³⁷ Poblado cántabro en Argüeso. Fuente: http://www.regiocantabrorum.es/publicaciones/poblado_cantabro
- ³⁸ Embaladora de paja. Fuente: <http://www.magussa.com.mx/page/es/equipo-forrajero/empacadoras-rectangulares/serie-300/348/>
- ³⁹ Casa Burke. Nebraska (EEUU). 1903. Fuente: <https://es.slideshare.net/carolinamargar/presentacin-charla-construccion-con-paja-carolina-martinez>
- ⁴⁰ Iglesia Pilgrim Holiness. Arthur, Nebraska (EEUU). 1928. Fuente: <http://buildipedia.com/aec-pros/construction-materials-and-methods/straw-bale-construction>
- ⁴¹ Casa Feuillette. Montargis (Francia). 1921. Fuente: <https://sustentabilidadenaopalavraeacao.blogspot.com/2013/10/uma-casa-em-palha-com-93-anos-maison.html>
- ⁴² Matts Myhrman y Judy Knox. Creadores "The Last Straw". Fuente: <https://thelaststraw.org/who-are-we/history/>
- ⁴³ Auditorio. Exp. Floriade 2002. Fuente: <https://strobouw.nl/project/floriade-2002-rabobank/>
- ⁴⁴ Logos principales asociaciones europeas const. con paja. Fuente: FASBA, SBN StroBrouw Nederland, RFCP – Les compaillons, ASBN, RCP Red de Construcción con Paja.
- ⁴⁵ Bechter Georg. Strohhaus. Sistema portante. Fuente: <http://bechter.eu/13-strohhaus/de-67>
- ⁴⁶ Haus D-P. Atelier Werner Schmidt. Sistema no portante. Fuente: <https://www.atelierwernerschmidt.ch/wohnhaus-weinkellerei-kurtatsch>
- ⁴⁷ House-S. Architekten Scheicher. Sistema no portante. Fuente: <https://apps.derstandard.at/privacywall/story/2000040659245/ein-ganz-normales-haus-aus-stroh>
- ⁴⁸ Sala polivalente circular. Sistema Nebraska. Fuente: <https://www.okambuva.coop/sala-polivalente-circular/>

ESTUDIO Y APLICACIONES DE LAS CONSTRUCCIONES CON FARDOS DE PAJA | BENEFICIOS DE LOS MATERIALES NATURALES

- ⁴⁹ Casa con muros portantes. Sistema Nebraska. Fuente: <https://www.arquitecturayempresa.es/noticia/balas-de-paja-arquitectura-sostenible>
- ⁵⁰ Fardos jumbo portantes. Georg Bechter. Fuente: <http://bechter.eu/13-strohhaus/de-67>
- ⁵¹ Flejes comprimiendo muro. Fuente: <https://tallerkaruna.org/que-sistema-elegir-para-construir-con-paja/>
- ⁵² Casa con muros portantes. Sistema Nebraska. Fuente: <http://www.ecohabitar.org/europa-sigue-apostando-por-el-desarrollo-de-la-construccion-con-balas-de-paja/>
- ⁵³ Capas de revocos naturales. Fuente: <http://www.ecohabitar.org/arcilla-en-la-construccion-como-mezclar-y-aplicar-revocos-de-arcilla-3a-parte/>
- ⁵⁴ Proceso artístico para revocos naturales. Fuente: <http://www.ecohabitar.org/arcilla-en-la-construccion-como-mezclar-y-aplicar-revocos-de-arcilla-3a-parte/>
- ⁵⁵ Amazon Nails. Casa dos plantas. Sistema Nebraska. Fuente: <http://naturalhomes.org/timeline/quietearth-winter.htm>
- ⁵⁶ Cimentación en zanja de grava con tubo drenante. Fuente: Elaboración propia.
- ⁵⁷ Cimiento y sobrecimiento a base de gaviones. Fuente: Elaboración propia.
- ⁵⁷ Cimiento y sobrecimiento a base de gaviones. Fuente: Elaboración propia.
- ⁵⁹ Casa de paja. La lama foundation. Postes y vigas exteriores. Fuente: <http://leicesterexchanges.com/2011/02/25/we-have-to-adapt-culturally-to-climate-change/lama-foundation-2/>
- ⁶⁰ Autoconstrucción en Monleras. Postes y vigas interiores. Fuente: <https://tallerkaruna.org/sistema-con-estructura-de-madera-postes-y-vigas/>
- ⁶¹ Arq. sin fronteras en Valladolid. Postes y vigas centrados. Fuente: <https://www.construible.es/2010/06/06/construccion-con-fardos-de-paja>
- ⁶² BAG Offinamobile y Paolo Robazza. Postes y vigas cajón. Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-223937/la-primera-casa-urbana-construida-de-fardos-de-paja-en-roma-italia>
- ⁶³ Construcción temporal La ciudad verde. Floriade. Fuente: https://strobouw.nl/project_category/nederland/page/2/
- ⁶⁴ Muros no portantes de relleno. Atelier Werner Schmidt. Fuente: <https://www.atelierwernerschmidt.ch/wohnhaus-weinkellerei-kurtatsch>
- ⁶⁵ Postes y vigas o de relleno. Atelier Werner Schmidt. Fuente: <https://www.atelierwernerschmidt.ch/wohnhaus-weinkellerei-kurtatsch>
- ⁶⁶ Postes y vigas pequeñas. Instituto Español de Baubiologie. Fuente: <https://info46591.wixsite.com/cinnamonart/techo-reciproco-muros-de-paja-barro>
- ⁶⁷ Sistema de poste desconectado. Fuente: Elaboración propia
- ⁶⁸ Disposición de postes y vigas de sección grande. Fuente: Elaboración propia
- ⁶⁹ Disposición de postes y vigas de sección pequeña. Fuente: Elaboración propia
- ⁷⁰ Mediante plaquetas metálicas. Fuente: Elaboración propia
- ⁷¹ Mediante ganchos y cables. Fuente: Elaboración propia
- ⁷² Mediante anclaje de madera. Fuente: Elaboración propia
- ⁷³ Ecoalde de la baie. Canadá. Construcción GREB. Fuente: http://www.greb.ca/GREB/Ecohameau_de_La_Baie.html

- ⁷⁴ Casa Dery. Quevec. Canadá. Construcción GREB. Fuente: <https://casagreb.files.wordpress.com/2013/02/julio-tamata-edificar-con-madera-paja-y-cal-aplicando-la-tc3a9cnica-greb.pdf>
- ⁷⁵ Fardo de paja entre entramado de madera. Fuente: <https://bioconstruible.wordpress.com/2016/03/30/el-sistema-greb-ii/>
- ⁷⁶ Detalle en esquina. Construcción GREB. Fuente: <https://bioconstruible.wordpress.com/2016/03/30/el-sistema-greb-ii/>
- ⁷⁷ Encofrado y mortero del muro GREB. Fuente: <http://casadepaja.es/muros-greb/>
- ⁷⁸ Julio Tamata. Construcción GREB. Fuente: <https://casagreb.files.wordpress.com/2013/02/julio-tamata-edificar-con-madera-paja-y-cal-aplicando-la-tc3a9cnica-greb.pdf>
- ⁷⁹ Sistema GREB. Fuente: Elaboración propia
- ⁸⁰ Hajo Schilperoort. Haaren. Colocación fardos. Técnica CUT. Fuente: <https://strobouw.nl/project/haaren/>
- ⁸¹ Casa Steensel. Exterior. Técnica CUT. Fuente: <https://strobouw.nl/project/steensel/>
- ⁸² Hajo Schilperoort. Haaren. Montantes verticales. Fuente: <https://strobouw.nl/project/haaren/>
- ⁸³ Hajo Schilperoort. Haaren. Zuncho perimetral. Técnica CUT. Fuente: <https://strobouw.nl/project/haaren/>
- ⁸⁴ Hajo Schilperoort. Haaren. Listones tensión vertical. Fuente:
- ⁸⁵ Casa Steensel. Acabado interior. Técnica CUT. Fuente: <https://strobouw.nl/project/steensel/>
- ⁸⁶ Ingredientes revoco arcilla. Técnica CUT. Fuente: <https://www.ecohabitar.org/revocos-de-arcilla-consideraciones-ingredientes-y-preparacion-2a-parte/>
- ⁸⁷ Floriade 2002. Tom rijven y Giesen Architecten. Técnica CUT. Fuente: <https://strobouw.nl/project/floriade-2002-rabobank/>
- ⁸⁸ Esquema distribución de tensiones cuando se cortan las cuerdas de los fardos. Fuente: Elaboración propia
- ⁸⁹ Sistema CUT. Fuente: Elaboración propia
- ⁹⁰ Casa biológica. Een til Een. Técnica prefabricada modular. Fuente: <http://www.seguro-arquitectos.es/la-primera-casa-biologica-del-mundo-esta-dinamarca/>
- ⁹¹ Ecocon. Características físicas de panel de paja. Fuente: <https://www.ecococon.it/spanish/>
- ⁹² Puesta en obra módulos. Mano especializada ecocon. Fuente: <https://www.ecococon.it/spanish/>
- ⁹³ Fabricación manual en taller prefabricado modulares. Fuente: <https://strobouw.nl/project/zwanenburg/>
- ⁹⁴ Amsterdam. Noord Schmid. Prefabricado urbano. Fuente: <https://strobouw.nl/project/amsterdam-noord/>
- ⁹⁵ Acabado panel fibras de madera. Sistema Wrapping. Fuente: <https://drive.google.com/file/d/0B51korpXd7d2QW4yTFZ3bz12Ulk/view>
- ⁹⁶ Fardos atados a muro. Sistema Wrapping. Fuente: <https://drive.google.com/file/d/0B51korpXd7d2QW4yTFZ3bz12Ulk/view>
- ⁹⁷ Remate hueco ventana. Sistema Wrapping. Fuente: <https://drive.google.com/file/d/0B51korpXd7d2QW4yTFZ3bz12Ulk/view>