

PARAMENTOS Y PANELES MODULARES PREFABRICADOS CON PAJA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS Y REHABILITACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICACIONES

¹Lopez Altuna, Alejandro; ²Iborra Lucas, Milagro

¹okambuva, coop.V. bioconstrucción

²Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Universitat Politècnica de Valencia
e-mail: alejandro@okambuva.coop, miborra1@csa.upv.es

RESUMEN

La paja comprimida en balas o pacas, con una densidad mayor a los 90kg/m³, como es habitual en la agricultura contemporánea, con aperos de tecnología convencional, adquiere unas propiedades especiales como material de construcción, por su compacidad y capacidad aislante. En los últimos 4 años se han triplicado en Europa las edificaciones realizadas con muros de balas de paja, de más de 2.000 en 2010 a más de 6.000 actualmente (FASBA 2013). En países como Austria o Alemania, este material está recogido en sus Códigos Técnicos de la Edificación. Las edificaciones contemporáneas con paja cumplen eficazmente con estándares de eficiencia energética como el de *passivhaus*.

La paja de cereales como agro-fibra ha sido descubierta en los últimos años tanto por la industria de los biopolímeros como por la construcción. Hasta ahora se le había dado protagonismo a biofibras procedentes del lino, yute, cáñamo o algodón. Sin embargo para el uso de estos materiales son necesarias plantaciones y controles específicos, mientras que la paja de cereales constituye un residuo de la industria agroalimentaria.

En el mundo se cultivan 697.678.673 hectáreas de cereales, (Banco Mundial, 2013), de ellas la mayoría de arroz y trigo, cada tonelada de cereal produce 1,5 t de paja que por su alto contenido en silicatos no puede ser usada apenas para la alimentación animal, por tanto tiene que ser destruida cada año, provocando, en parte, desastres ambientales, con su incineración, por ejemplo.

Junto a la investigación y desarrollo de la construcción con paja, existen varias propuestas para la producción en serie de elementos prefabricados; ecococon.lt, eco-fab.co.uk, modcell.com, pailletech.be, strawbalehouse.co.uk, systemhausbau.at, [strohTec \(baubiologie.at\)](http://strohTec(baubiologie.at)), etc.

En un equipo formado por estudiantes de la ETSIE y la empresa bioconstructora okambuva.coop hemos desarrollado módulos elaborados con balas de paja y estructuras de madera, que se están aplicando en construcciones de viviendas unifamiliares con éxito. Un aspecto importante, junto a las prestaciones de este material acorde a las nuevas normativas referentes a la eficiencia energética, es la posibilidad de activar la economía local a través de soluciones sociales y ecológicas, ya que hacen posible el uso de recursos locales con tecnologías de baja inversión.

Palabras clave: bioconstrucción, balas de paja, prefabricados, biofibras, *passivhaus*

1.- Introducción

1.1.- La construcción con balas de paja

La paja es uno de los materiales de construcción más antiguos que conoce la humanidad, desde tiempos inmemoriales estuvo presente como fibra en ladrillos y muros de tierra arcillosa.

La bala de paja aparece a mediados del siglo XIX, con el invento de la mecanización necesaria para crear bloques compactos y así poder almacenar mejor los residuos de la cosecha de los cereales para diversos usos posteriores. Con la creación de las primeras embaladoras, en Nebraska, aparecieron las primeras construcciones con estos bloques.[Fig.1]



Fig.1 “Imagen de la casa de paja de la familia Simonton, Purdum, Nebraska (1908)”.
Fuente: www.prairiefirenewspaper.com



Fig.2 “Patente US 225065 A, Marzo 1880, Construcción con Balas de Paja”.
Fuente: <https://encrypted.google.com/patents/US225065>

Las primeras patentes para la construcción con balas de paja datan de finales del siglo XIX [Fig.2], lo que evidencia el interés técnico que despertó este material desde su aparición. A mediados del siglo XX ya Europa contaba con las primeras construcciones con balas de paja, una propuesta del arquitecto Feuillette, Francia, como solución para construir viviendas de bajo coste para los damnificados de la primera guerra mundial. Esta casa construida en 1921, es hoy la sede del Centro

Nacional Francés para la Construcción con Paja y se conserva en perfecto estado.[Fig.3]

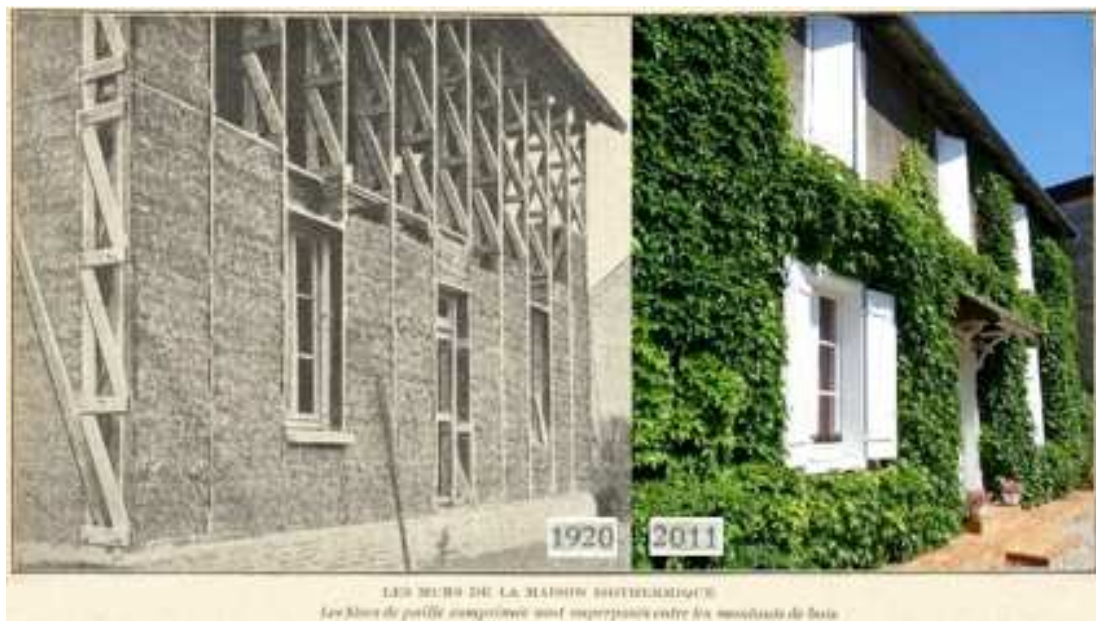


Fig.3 “Fotografías de la Maison Feuillet, comparando una imagen de 1920 y otra de 2011” Fuente: Fondation du patrimoine.

No es hasta los años 90 del siglo XX que no comienza una etapa intensa en el descubrimiento y desarrollo de las posibilidades de la bala de paja como material de construcción.

1.2.- La Bala de Paja como material de Construcción

Una bala o fardo de paja apta para la construcción, es el bloque comprimido de paja de cereal, fundamentalmente trigo, centeno o arroz, prensadas con una densidad mayor de 80kg/m³ y con una humedad relativa menor del 18%. Los aperos de embalaje de paja con que cuenta la industria agraria actualmente, elaboran piezas de unos 50 cm de ancho, 35 cm de altura y entre 80 y 110 cm de longitud, y logran una densidad de hasta 120-130kg/m³. En el mundo se cultivan más de 600 millones de hectáreas de cereales [1], de ellas la mayoría de arroz y trigo, cada tonelada de cereal produce 1,5 t de paja que por su bajo contenido nutritivo no puede ser usada apenas para la alimentación animal, por tanto tiene que ser destruida cada año, provocando, en parte, importantes desastres ambientales, con su incineración, por ejemplo.

La paja muestra una estructura química y unas propiedades físicas muy similares a la madera. Las balas, nos permiten, perfectamente crear muros que pueden ser incluso portantes y provistos de recubrimientos de mortero (arcilla, cal, yeso), cumplen con todas las expectativas correspondientes a un cerramiento en la construcción convencional y colaborarán de manera significativa en el aislamiento térmico. [7]

El arquitecto e ingeniero alemán Gernot Minke, que ha dirigido muchos de los ensayos realizados sobre muros de paja en Alemania, apunta desde su experiencia que los muros de balas de paja pueden llegar a soportar cargas superiores a 500kg/m de muro portante, lo que serían 1000kg/m². [2] En los muros de balas de paja revestidos con morteros de arcilla se han llevado a cabo ensayos de resistencia al fuego, dando ellos resultados satisfactorios. (Alemania RF90, EEUU RF120)

Ensayados estos factores el coeficiente de conductividad térmica de la bala de paja se sitúa entre **0,0337 y 0,086 W/mk.**

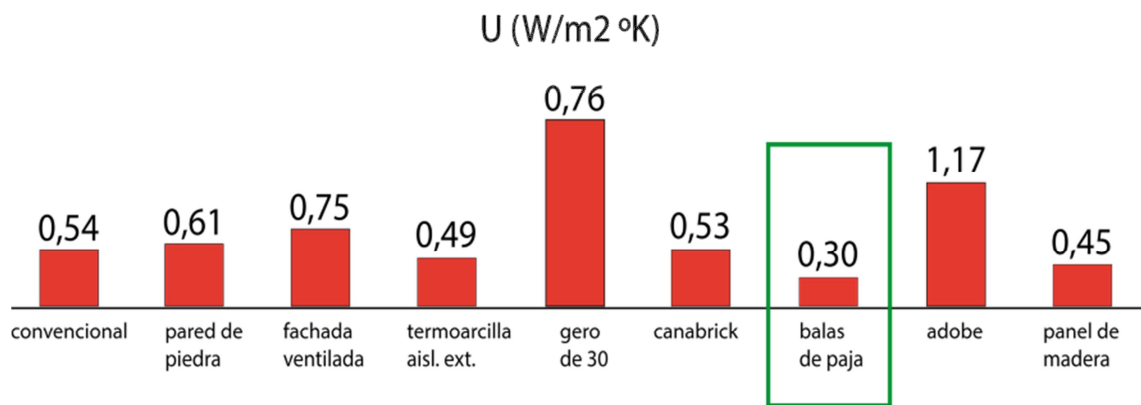


Fig.4 “Gráfica de transmitancia térmica de diferentes materiales expresada en W/m²k”. Fuente: Revista Ecohabitar, N°33, Primavera 2012 [12].

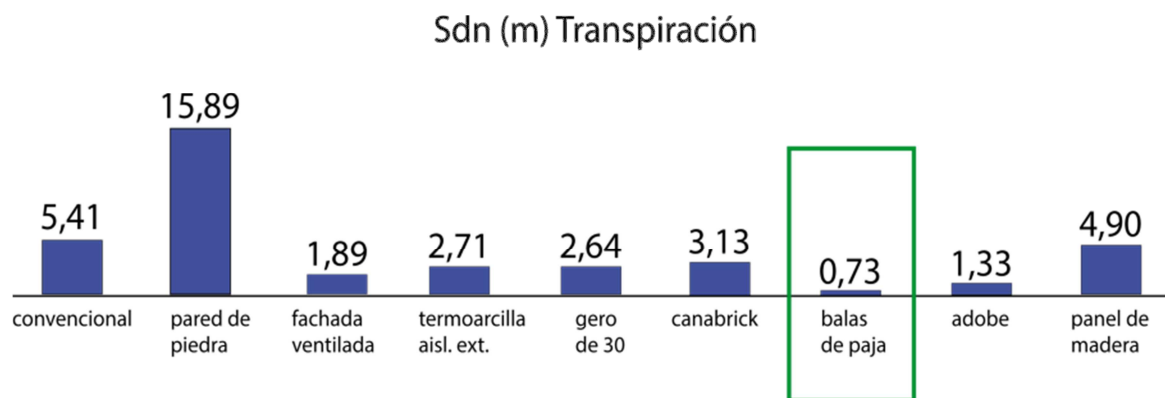


Fig.5 “Así también su transpirabilidad”. Fuente: Revista Ecohabitar, N°33, Primavera 2012 [12].

Junto a su capacidad estructural, el aporte más importante de la bala de paja es su poder aislante. Estas propiedades junto a la enorme disponibilidad y la poca inversión tecnológica necesaria para la manipulación han sido la clave para el desarrollo de la construcción con paja en los últimos 20 años.

1.3.- Construcción con Balas de Paja en la Europa contemporánea

La bala de paja para la construcción se ha ido institucionalizando en Europa. En Alemania y Austria existe una certificación oficial para la bala de paja como material de construcción [10], en Francia [Fig.6], país líder en Europa con casi 3000 edificaciones, se trabaja según las Regla profesionales para la construcción con Paja. [11].

En España existe la Red de Construcción con Paja desde 2005 y algunos proyectos realizados en este campo. [4]

Actualmente, los países europeos trabajan conjuntamente a través del programa Leonardo Da Vinci, de aprendizaje permanente, en la elaboración de recomendaciones para las normativas y para la formación profesional en este ámbito para los países miembros. [5]



Fig.6 “Residencia Jules Ferry, Francia construidas con Balas de Paja, passivhaus, en 7 alturas”. Fuente: <http://www.toit-vosgien.com/fr/performances-energetiques/immeuble-bois-grande-hauteur.html>

Las tipologías constructivas con balas de paja son diversas. La bala es usada como muro portante (estilo Nebraska) [9], pero también dentro de diferentes estructuras, como relleno o aislante con mayor o menor aporte estructural.

1.4.- Dificultades en el uso de la Bala de Paja para la Construcción Convencional

El uso de la Bala de Paja presenta algunas dificultades para su integración en la construcción convencional.

En primer lugar de tipo subjetivo, claramente, al proceder de la agricultura, del medio rural, no genera confianza per se, el ámbito de la construcción está regulado y condicionado por complejas estructuras normativas y una bala de paja, conocida como alimento ganadero, es difícil de imaginar en el marco de proyectos de ingeniería de edificación contemporáneos.

Cierto es que, dado a que este material, se elabora en este formato con fines logísticos dentro del sector agropecuario y no para la construcción, no hay una convención, acuerdo o norma para su control de calidad apropiado para su uso en edificación.

Austria y Alemania han establecido ya una regularización y un control certificado para la construcción, basado en densidad, humedad y pureza, pero, por ejemplo, dentro de las Reglas Profesionales de Construcción con Paja, elaboradas y vigentes en Francia[3], se advierte con insistencia sobre la necesidad de intensa manipulación de una bala de paja antes de ser integrada en un muro. [Fig.7]



Fig.7 “Manipulación de la Bala de Paja en obra de muros autoportantes” Fuente: okambuva.coop

Debido al diverso origen del material no podemos conocer con exactitud de antemano sus propiedades higrotérmicas, ni las estructurales, ni las dimensiones definitivas, una vez en presencia del material, podemos proceder a comprobar y realizar el control de calidad necesario, lo que dificulta generalmente el trabajo de proyecto, cálculo y planificación. Construir con Balas de Paja exige espacio y condiciones en la obra para almacenaje y manipulación y genera residuos que si bien son biodegradables son voluminosos y molestos, en forma de polvo y paja en el ambiente, indudablemente un problema para la construcción urbana. Una carga de balas de paja no viene paletizada y protegida lista para colocar, sino que proviene de almacenes de forraje o directamente del campo, en grandes camiones.

2.- Objetivos

Las experiencias previas en el campo de la prefabricación con balas de paja nos llevan a plantearnos la búsqueda de una solución en este sentido, adaptada a nuestro entorno y aplicable a nuestra realidad, para ello se plantea como objetivo principal el diseño, desarrollo y fabricación de un sistema constructivo, llamado alfaWALL, el cual consiste en un sistema modular para cerramientos, basado en estructuras de madera que contienen balas de paja. Además, que la estructura de madera y sus dimensiones permitan un montaje simple, con herramienta manual convencional y tornillería especial de construcción. Este sistema, al mismo tiempo, permite que no sean necesarias estructuras portantes complementarias en la edificación. El alcance de la investigación está inmerso en un conjunto más global, donde no solo debe proponer soluciones técnicas del sistema constructivo de prefabricación específicamente, sino que también debe tener en cuenta aspectos como la estandarización y normalización de los módulos prefabricados; la logística y manipulación que permitan utilizar medios asequibles y finalmente potenciar la imagen y confianza del producto con el diseño de elementos constructivos cuyas propiedades y características altamente eficientes, acerquen este material a las prácticas de la construcción convencional.

3.- Módulos prefabricados con Balas de Paja

3.1.- Antecedentes en la prefabricación en paja

Muy interesante ha sido la respuesta de diversos países para el desarrollo de soluciones de prefabricación de muros, módulos y paneles. [10]

Los paneles prefabricados de paja y madera permiten una ejecución rápida, sencilla y limpia en zonas que así lo requieren, como en zonas urbanas. Por otro lado, hay

que subrayar la solidez y monolitismo que se consigue en el conjunto del producto, haciendo que la paja y la madera trabajen como un único ente.

Cada uno de los productos que han aparecido en el mercado tiene matices que los diferencian entre ellos, como por ejemplo la cantidad de materia prima, su fabricación o sus características formales.

El modo de fabricación de estos módulos también es un punto de bifurcación entre las alternativas existentes en el mercado. Hay fabricantes que deciden formar los módulos con balas de paja, otros usan paja suelta prensándola mediante unas matrices consiguiendo unos módulos continuos que facilitan la producción de elementos de cualquier altura. También tenemos la opción de no sólo tener nuestros cerramientos prefabricados en taller, sino también prerevocados. Esta alternativa tiene pros y contras, ya que el tiempo que puede que nos ahorre revocar en obra, puede que lo invirtamos en reparar las grietas o desperfectos provocados por el transporte, además de la complicación del peso añadido, que implicará una mayor dificultad en la manipulación y tener que recurrir a maquinaria auxiliar para su puesta en obra.

La diferencia más obvia, entre las diversas propuestas de mercado, es la variedad en cuanto a formas y dimensiones. Podemos encontrar módulos de gran formato como los de modCell de 3x3m [Fig.8] o módulos de bala individual como los de la nueva propuesta experimental balabox, España. De nuevo esto tiene sus pros y contras. Módulos grandes nos permiten ejecutar el cerramiento del muro rápidamente y con menor tornillería de montaje, pero nos supondrá un sobrecoste por la maquinaria necesaria para su manipulación, sobrecoste que no tenemos con módulos pequeños de bala. Por contraposición, los módulos pequeños conllevan mayores puentes térmicos, dificultades estructurales y el uso de una cantidad extra de madera, un recurso natural escaso, dato muy a tener en cuenta en nuestras latitudes si queremos respetar las directrices de una construcción sostenible.



Fig.8 “Modcell, Reino Unido, módulos prefabricados de hasta 3x3m”.

Fuente: www.modcell.com

3.2.- La propuesta alfaWALL

Las premisas y experiencias europeas nos llevaron a plantearnos la búsqueda de una solución en este sentido en nuestro entorno y aplicable nuestra realidad.

Tenemos paja, en nuestra región incluso, tenemos una zona crítica, señalada internacionalmente. La quema de la paja de arroz es un problema medioambiental grave, provocado en la misma Albufera de Valencia.

Las consecuencias del desastre político-económico de los últimos años nos han dejado capacidades productivas interesantes, en forma de talleres y espacios de las industrias locales que se encuentran, en gran medida inutilizadas.

La empresa okambuva, coop, de reciente creación, formada por profesionales de la construcción, que ha encarado el rumbo de su trabajo e investigaciones hacia el mundo de la construcción sana y sostenible, apoyada por la Escuela Superior de Ingeniería de la Edificación de la Universidad Politécnica de Valencia, ha desarrollado una propuesta, que está arrojando excelentes resultados

El sistema constructivo alfaWALL es un sistema modular para cerramientos, basado en estructuras de listones de madera que contienen balas de paja [Fig.9]

Las balas de paja prensadas con una densidad mínima de 120kg/m³, fijadas dentro de una estructura de madera son estructuralmente portantes, no son necesarias estructuras portantes complementarias para la edificación. La estructura de madera y sus dimensiones permiten un montaje simple, con herramienta manual convencional y tornillería especial de construcción.



Fig.9 "alfaWALL, composición de un muro, a partir de diferentes tipos de módulos".

Fuente: okambuva.coop

El diseño, desarrollo y fabricación de los prototipos se hizo analizando soluciones experimentadas en otros países europeos, específicamente de la empresa lituana ecocon, que documenta sus ensayos, resultados y certificaciones conformes a normativas europeas vigentes[6]. Su propuesta es morfológicamente atractiva por el poco uso de madera, en relación con otros elementos europeos. Este aspecto es especialmente importante en España y sobre todo en la zona mediterránea.

Pero se emplea paja "suelta" que es prensada dentro de los esqueletos de madera. Esta solución supone una importante inversión técnica, en cuanto a prensas y matrices se refiere. El aporte fundamental se basa en usar balas convencionales, teniendo en cuenta que tanto la normativa alemana, austriaca o francesa exigen un mínimo de 80kg/m³ y la propuesta lituana certifica usar 100kg/m³, encontramos que

en España, en las fundamentales zonas de cultivo de cereales se están empleando máquinas embaladoras que son capaces de comprimir a una densidad mayor de 120kg/m³, sin afectar precio o logística. Este hecho reduce la inversión tecnológica de fabricación y amplía las posibilidades de usar medios apropiados disponibles.

Ha sido muy importante la elección de la madera, y sobre todo usando un sistema que requiera poca, para poder hacer frente a las solicitudes estructurales que se le exige a un muro portante, madera C24, estando esta cepillada en todas sus caras para poder conseguir un ensamblaje apropiado de sus piezas: montantes, travesaños, listones, diagonales, etc. [Fig.10]

En estos momentos se utiliza pino español de las serrerías de Soria. También se ha tenido en cuenta el tipo de tornillería a usar, pues los tornillos no solo van a cumplir la función de atado y montaje, si no en muchos casos son los que resisten la carga, axial o incluso a cortante. En este caso, sí ha sido necesario valerse de fabricantes europeos de experiencia y prestigio, con suficiente documentación, ensayos y orientación técnica, como son los de la marca Reisser [13], de Alemania. [Tabla 1]

Para el montaje, en taller, se necesitan herramientas y condiciones al uso en la carpintería convencional, con un rendimiento aproximado de 10m² de muro diarios, con unos 4 operarios. Una mayor mecanización, con matrices hidráulicas, etc, mejorarían indudablemente dicho rendimiento, pero para el estado actual es completamente satisfactorio.

Una casa unifamiliar de alrededor de 100m² de superficie construida, necesitaría unos 160m² de muro, el volumen total de módulos alfaWALL es de 50m³, unas 8t a transportar y manipular con medios logísticos convencionales.

Los módulos pueden ser fabricados específicamente para cada proyecto, con lo cual es posible adaptar sus dimensiones dentro de una retícula condicionada tecnológicamente [Fig.11]. Los muros pueden ser recubiertos con morteros de arcilla y/o cal, o aplacados con tableros de fibra de madera ya que los marcos estructurales permiten la cómoda fijación.



Fig.10 “Montaje de los módulos alfaWALL” Fuente: okambuva.coop

Madera estructural	Pino C24
Tablero contrachapado	UNE-EN 314
Paja	Arroz, trigo, centeno
Densidad de la paja	120kg/m ³
Humedad relativa	< 15%
Tornillería de construcción	certificada según UNE-EN 10002-1

Tabla 1 “Materiales usados en los módulos alfaWALL”. Fuente: okambuva.coop

Se fabrican 3 tipos de módulos fundamentalmente, el módulo estándar de pared, dinteles y módulos alféizar [Tabla 2]. Sus dimensiones permiten una gran cantidad de posibilidades combinatorias para diferentes diseños y exigencias espaciales. [Fig.11]

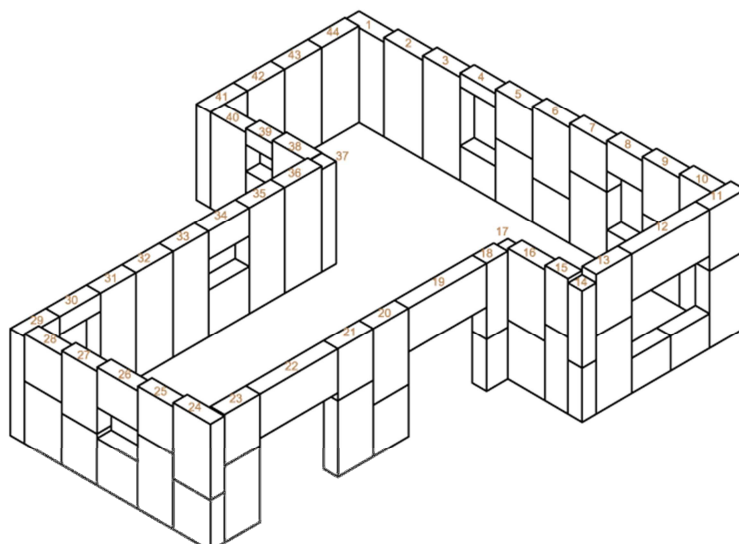


Fig.11 “Modulación en proyecto de casa unifamiliar”. Fuente: okambuva.coop

Ancho mínimo del módulo	0,40 m
Ancho máximo del módulo	1,05 m
Altura mínima del módulo	0,40 m
Altura máxima del módulo	2,90m
Luz máxima de dinteles	2,90 m
Peso máximo de un panel	250 kg
Volumen máximo de un panel	1m ³

Tabla 2 “Dimensiones y características formales de los módulos”.
Fuente:okambuva.coop

Los muros creados con alfaWALL concentran las mejores propiedades físicas de los elementos que lo componen, permitiendo así un importante aporte a la eficiencia energética de las edificaciones. [Tabla 3] Los cálculos se han realizado sobre la base de los modelos, experiencias y sistemas de cálculo convencionales actuales a espera de ensayos específicos.

Valor de transmitancia térmica (U)	0,166 W ⁰ /m ² °C
Conductividad térmica λ	0,067 W/m°C
Factor de resistencia a la difusión de vapor de agua (μ)	3-6
Espesor de la capa de aire equivalente a la difusión del vapor (Sδ)	1,6-2,4m

Tabla 3 “Valores físicos del panel, con revestimiento de 4cm interior de mortero de arcilla y 4 cm exterior de mortero de arcilla y cal hidráulica natural NHL3.5”.
Fuente: okambuva.coop

Es importante destacar, que la utilización de alfaWALL como sistema constructivo representa un significativo aporte a la edificación sostenible, por sus características medioambientales. [Tabla 4]

El consumo de recursos energéticos	Total de energía primaria	4.9E+02 MJ
	La energía renovable	4.91E+02 MJ
	La energía no renovable	7.87E+00 MJ
	proceso de Energía	8.89E+00 MJ
El consumo de agua	El consumo total de agua	3.04E+01 litro
La contaminación medioambiental	Cambio climático	-9.63E+00 kg equivalente CO2
	Acidificación atmosférica	9.04E-06 kg equivalente SO2

Tabla 4 “Características medioambientales (En la totalidad de su ACV y según el UF acordado)”. Fuente: okambuva.coop

4.- Conclusiones

Dada su calidad de ejecución y sumado al alto poder aislante que tiene la paja, conseguimos unos cerramientos muy susceptibles de poder alcanzar distintivos de alta calidad como el certificado passivhaus u homólogos españoles, que dada la creciente necesidad y preocupación por la eficiencia energética, hay que tener muy en cuenta. [Fig.12]. Estos resultados son alcanzables con recursos fundamentalmente locales o cercanos y tecnologías apropiadas, lo que representaría un aporte de múltiples efectos. Una propuesta concreta con consciencia ecológica y socioeconómica.

Una pequeña empresa, como es okambuva, puede fabricar estos elementos y edificar con ellos sin necesidad de grandes inversiones ni financiaciones, manteniendo una rentabilidad y respondiendo de manera competitiva a una necesidad de desarrollo sostenible del sector de la construcción.



Fig.12 “Montaje de cerramientos en casa unifamiliar” Fuente: ecocon.it

El proyecto continúa con ensayos, más investigación y nuevos retos en la búsqueda de optimización y diversificación de soluciones.

Por ahora, se está llevando a cabo el primer proyecto de vivienda unifamiliar, en la localidad de Chiva, Valencia, con un diseño de Phi-Design, arquitectos, de Puzol, Valencia.

AGRADECIMIENTOS

Estudiantes de la ETSIE de la UPV Irene Romans y Adrià Llorens Alcaide Ingenieros Pablo Monzó Llobell y Joan Romero Clausell, socios cooperativistas de okambuva, coop.

Maestro Carpintero Manuel Brocal Peña
Phi-Design, Arquitectos

REFERENCIAS

- [1] Banco Mundial, 2013
- [2] Minke G., Mahlke F. Manual de construcción con fardos de paja , página 22, Editorial Fin de Siglo
- [3] Règles professionnelles de construction en paille, Réseau français de la construction en paille
- [4] www.casasdepaja.org
- [5] www.strawleonardo.eu
- [6] www.ecococon.it
- [7] Albert Solé Neila. (2014). Murs Estructurals de Bales de Palla, Proyecto final de Máster, Escola d'arquitectura de Barcelona.
- [8] José Antonio Sánchez López. (2013). Sistema CST de construcción con balas de paja. Proyecto Final de Máster, Universidad de Alicante.
- [9] Rikki Nitzkin y Maren Termens. (2010). Casas de Paja: una guía para autoconstructores,. Ed. EcoHabitar, España.
- [10] Neues Bauen mit Stroh in Europa, Hebert & Astrid Gruber, Helmuth Santler. (2012). Ed. Ökobuch, Freiburg, Alemania.
- [11] Luc Floissac (2012). La Construction en Paille, Ed. Terre Vivante, Francia,.
- [12] Revista Ecohabitar, España, N°33, Primavera 2012
- [13] www.reisser-screws.com