UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE CONCEPCIÓN – REY BALDUINO DE BÉLGICA

CONSTRUCCIÓN CON FARDOS DE PAJA: UNA SOLUCIÓN SUSTENTABLE PARA LA "FINCA ECOLÓGICA PREMA MANDAL"

Trabajo de Titulación para optar al Título
de Técnico Universitario DIBUJANTE
PROYECTISTA

Alumnos:

Javiera Alejandra Mardones Cuevas

Ibar Ernesto Jofré Muñoz

Profesor guía:
Sr. Sergio Eduardo Hernandez Aravena

2018

RESUMEN

El presente trabajo describe los métodos constructivos con fardos de paja como una alternativa sustentable para construir, además de explicar sus propiedades físicas como material de construcción y su desarrollo a lo largo de la historia. Este sistema constructivo se aplica a una necesidad real de la Finca Ecologice Prema Mandal de la provincia Bio-Bio, donde se diseña un edificio para la práctica de yoga, una disciplina que caracteriza a esta comunidad, desarrollando un modelo arquitectónico en SketchUp y plano de diseño en AutoCAD.

Keywords:

FARDOS DE PAJA, SUSTENTABLE, PROPIEDADES FISICAS, FINCA ECOLÓGICA, YOGA, DISEÑO, PROPUESTA ARQUITECTONICA.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 1
OBJETIVO GENERAL 2
OBJETIVOS ESPECIFICOS 2
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO 3
1.1. FINCA ECOLÓGICA PREMA MANDAL 3
1.2. HISTORIA DE LAS CONSTRUCCIONES CON FARDOS DE PAJA 6
1.2.1. Las primeras construcciones 6
1.2.2. El renacimiento de las construcciones con fardos de paja 7
1.3. INCORPORACIÓN AL SISTEMA NORMATIVO 11
1.3.1. Ensayo de Transmitancia térmica (NCh851:2008) 12
1.3.2. Ensayo de carga horizontal (NCh802:1971) 13
1.3.3. Ensayo de carga vertical (NCh801:2003) 14
1.3.4. Ensayo de resistencia al fuego (NCh935/1:1997) 14
1.4. ORGANIZACIONES EN CHILE QUE PROMUEVEN LA CONSTRUCCIÓN CON FARDOS DE PAJA…. 16
Red Chilena de Construcción con fardos de Paja 16
¡Construcción con fardos de paja! o "CONTRUPAJA" 16
Red de Construcción con Paja de habla hispana. 16
1.5. COSTOS DE LA CONSTRUCCION CON FARDOS DE PAJA 17
1.6. SISTEMAS CONSTRUCTUIVOS PARA MUROS CON FARDOS DE PAJA 19
1.6.1. Muros portantes (Método Nebraska): 19
1.6.2. Muros no portantes 21
1.7. BALANCE DE CO_2 Y CONTENIDO DE ENERGÍA PRIMARIA 22
CAPÍTULO 2: CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE CON FARDOS DE PAJA 24
2.1. LA PAJA COMO MATERIA PRIMA 24
2.1.1. Corte y trilla 24
2.1.2. Compactación de fardos de paja 25
2.2. FARDOS DE PAJA PARA LA CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE CALIDAD 28
2.2.1 Clasificación de la eficiencia energética 30
2.3. PROPIEDADES FISICAS DE LA PAJA 31
2.3.1. Transmisión y aislamiento térmico 31
2.3.2. Comportamiento hídrico 35
2.3.3. Protección acústica 36
2.3.4. Protección del fuego 38
CAPITULO 3: EJEMPLOS NACIONALES E INTERNACIONALES DE CONSTRUCCIONES CON FARDOS DE PAJA 40
3.1. EN CHILE 40

3.1.1. Casa Coya, cerca de Machalí, VI Región 40
3.1.2. Jardín Waldorf "Casita del Bosque" en Limache, V Región 42
3.1.3. Casa "Muelle" en Peñalolén, Santiago 43
3.2. EN EL EXTRANJERO 44
3.2.1. Casa en Chapadmalal, cerca de Mar de Plata, Argentina 44
3.2.2. Prototipo para la vivienda social en Sentinela do Sul, Brasil 45
3.2.3. Casa en Westerlinde, Alemania 46
3.2.4. Casa en Langtaufers, Italia 47
3.2.5. Estación Ecológica en Prenzlau, Alemania 48
3.2.4. Cúpula de música en Forstmehren, Alemania 49
CAPÍTULO 4: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL RECINTO DE YOGA PARA LA COMUNIDAD DE LA FINCA ECOLÓGICA PREMA MANDAL 51
4.1. PROPUESTA DE DISEÑO Y MÉTODO CONSTRUCTIVO UTILIZADO 51
4.1.1. Emplazamiento y orientación 53
4.2. CIMIENTOS Y PISO 54
4.3. MUROS Y TECHUMBRE 56
4.3.1. Ventanas y puerta 57
4.2.2. Techumbre 59
4.4. REVOQUES 61
4.4.1 Revoque interior 61
4.4.2. Revoque exterior 62
CONCLUSIÓN 64
BIBLIOGRAFÍA 65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Casona Finca Ecológica “Prema Mandal”

Figura 1.2 “Bhaktra Prya Devi Dasi” Integrante de la Finca Ecológica Prema Mandal

Figura 1.3 Voluntariado de bio-construccion en la Finca Prema Mandal

Figura 1.4 Lugar donde se realizan las reuniones, ceremonias, etc.

Figura 1.5 Santuario Eco Yoga Park

Figura 1.6 Voluntarios cocinando en la Finca.

Figura 1.7 Vaca rescatada de un matadero

Figura 1.8 Fawn Lake Ranch, Hyannis, Nebraska, 1900-1914

Figura 1.9 Burrit Mansion, Huntiville, Alabama 1938

Figura 1.10 Maison Feuillette, Montagris, Francia, 1921

Figura 1.11 Establos de fardos de paja en la antigua RDA

Figura 1.12 La primera casa de fardos de paja construida en Alemania con permiso de construcción en Windeck-Werfen, 1999 (Rut y Matthias Bönish)

Figura 1.13 Edificio experimental con muros portantes de fardos de paja, Universidad de Kassel, Alemania, 2000

Figura 1.14 Club 99, Sieben Linden, Alemania, 2001 (Börn Meenen Martin Stempel)

Figura 1.15 Casa de muros portantes cerca de Trier, Alemania, 2002-2005 (Peter Weber)

Figura 1.16 Cupula no portante de fardos de paja, Westerwald, Alemnaia, 2004 (Gernot Minke)

Figura 1.17 Casa multifamiliar "Strohpolis", Sieben Linden, 2007 (Dirk Schamer)

Figura 1.18 S-House, Edificio piloto para el uso de materiales renovables, Böheimkirchen, Austria, 2005 (Georg Scheicher, GrAT)

Figura 1.19 Transmitancia térmica (U) y resistencia térmica (Rt) mínimos de la envolvente, según las 7 zonas correspondientes al proyecto en los planos de zonificación térmica del Ministerio de Vivienda y Urbanismo

Figura 1.20 Ensayo de transmitancia térmica para muro de fardos de paja

Figura 1.21 Ensayo al corte y compresión para muros de fardos de paja

Figura 1.22 Ensayo de resistencia al fuego para muro de fardos de paja

Figura 1.23 Representes y exponentes del método constructivo con fardos de paja realizando un ensayo de resistencia al fuego en IDIEM U. de Chile

Figura 1.24 Logo Red Chilena de la Construcción con Fardos de Paja

Figura 1.25 Logo "CONSTRUPAJA"

Figura 1.26 Logo Red de Construcción con Fardos de Paja

Figura 1.27 Construcción de casa con sistema no portante

Figura 1.28 Ejemplo de muro no portante con paneles de madera y aislamiento de fardos de paja

Figura 1.29 Ejemplo de un muro portante de fardos de paja

Figura 1.30 Pretensado de muros de fardos de paja portante según [Steen et. al. 1994]

Figura 1.31 Proporción del contenido de energía primaria de los procesos. (Fardos pequeños, escenario favorable) [Krick 2008]

Figura 2.1 Cereales de donde se obtiene la paja

Figura 2.2 Cosechadora de cereales

Figura 2.3 Muestra las dimensiones típicas de fardos de paja

Figura 2.4 Dimensiones de un fardo de paja

Figura 2.5 Enfardadora de fardos rectangulares, modelo Case SB531

Figura 2.6 Fardo suelto

Figura 2.7 Fardo firme

Figura 2.8 Enfardadora gigante CLAAS Quadrant 3300

Figura 2.9 Clases de eficiencia energética de edificios según demanda de energía para calefacción y refrigeración

Figura 2.10 Transporte de energía térmica en los fardos de paja.

Figura 2.11 Transmitancia térmica de muros de fardos de paja en función del espesor de la paja y de la orientación de los tallos con respecto al flujo de calor.

Figura 2.12 Capacidad de almacenamiento de calor de diferentes materiales de construcción.

Figura 2.13 Isotermas de sorcion de la paja de trigo, cebada centeno y espelta a una temperatura de 23 °C

Figura 2.14 Índice de aislamiento acústico para diferentes materiales de muro

Figura 2.15 Índice de aislamiento acústico de laboratorio para un muro no portante de fardos de paja con revoque de tierra de espesor 1 cm en ambas caras [según FASBA 2008]

Figuras 3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.4 Casa Coya, cerca de Machalí, VI Región, Chile

Figura 3.5 Jardín Waldorf "Casita del Bosque" en Limache, V Región, Chile

Figura 3.6 - 3.7 Casa "Muelle" en Peñalolén, Santiago, Chile

Figura 3.8 Casa en Chapadmalal, cerca de Mar de Plata, Argentina

Figura 3.9 Prototipo para la vivienda social en Sentinela do Sul, Brasil

Figura 3.10 - 3.11 Casa en Westerlinde, Alemania

Figura 3.12 – 3.13 Casa en Langtaufers, Italia

Figura 3.14 – 3.15 Estación Ecológica en Prenzlau, Alemania

Figura 3.16 – 3.17 – 3.18 Cúpula de música en Forstmehren, Alemania

Figura 4.1 – 4.2 Diseño arquitectónico. Render

Figura 4.3 Emplazamiento de la finca ecológica y el edificio para practicar yoga

Figura 4.4 Puente construido por personas de la Finca y que atraviesa el riachuelo de la misma

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

(RDA) República Democrática Alemana.

(CITEC) Centro de Investigación de Tecnologías de la Construcción de la Universidad del Bio-Bio.

(IDIEM) Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales. Universidad de Chile.

(SERVIU) Servicio de Vivienda y Urbanismo de Chile.

(IIT UdeC) Instituto de Investigaciones Tecnológicas de la Universidad de Concepción.

(DIN) es el acrónimo de Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán de Normalización).

(ISO) Organización Internacional de Normalización.

(FASBA) Asociación Alemana para la Construcción con Fardos de Paja

(AbZ) "Aprobación General" de esta técnica en Alemania.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, la industria de la construcción, ha tomado las riendas de la economía, con pocos cuidados respecto a los criterios ambientales, por otro lado, y en menor proporción, encontramos las buenas prácticas de diseño empleando materiales ecológicos convencionales para la construcción, que son cada vez más utilizados, como lo es la construcción con fardos de paja.

En el mes de abril se realizó una visita a la Finca Ecológica Prema Mandal, una comunidad de personas amantes de la tierra, la naturaleza, la espiritualidad, que demuestran respeto por los animales, el medio ambiente y que creen en un mundo más sostenible para el cual trabajan día a día tratando de generar mayor conciencia en las personas que habitan el planeta. Esta Finca Ecológica ubicada en la región del Biobío entre Concepción y Cabrero presenta la gran necesidad de construir un edificio para actividades recreativas como el yoga principalmente. Es así, como se determina realizar un trabajo de titulación desarrollando este tema poco convencional, pero a la vez muy llamativo e interesante de investigar, que es la "construcción con fardos de paja", a fin de ser responsable con el medio ambiente, como el método constructivo sustentable, el cual existe desde hace muchos años en el planeta, y que cada vez se hace más conocido, gracias a estudios e investigaciones que demuestran su eficacia y que certifican que la paja es uno de los materiales del futuro: económica, ecológica y gran aislante térmico y acústico. Además, permite el proceso de autoconstrucción que incluyen la participación de personas que no constituyen mano de obra especializada, ya que en este proceso constructivo pueden participar familias completas, amigos y vecinos, etc., ideal para trabajar en comunidad.

A pesar de que en Chile no se cuenta con normativa para este sistema de construcción, tampoco existe algún tipo de restricción que prohíba la construcción con fardos de paja. Muy distinta es el panorama en los Estados Unidos o en Europa donde este método además de implementarse desde el siglo XIX, ya cuanta con normativa específica en muchos países, como por ejemplo Estados Unidos, Alemania, Australia, Francia, etc. Aun así, son varias las construcciones con este material que se pueden encontrar en nuestro país.

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un espacio para la práctica periódica del yoga de las personas que integran la comunidad que habita la Finca Ecológica Prema Mandal, empleando un método constructivo basado en la utilización de fardos de paja.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Investigar los procesos y métodos de construcción con fardos de paja.
- Investigar las propiedades físicas del fardo de paja como material de construcción, sus ventajas y desventajas.
- Diseñar un modelo de construcción, que tenga una geometría adecuada al método constructivo, y que cumpla los requerimientos funcionales propios de la práctica del Yoga.
- Modelar el diseño en 3d con el software SketchUp, junto con la realización de planos de diseño en el software AutoCAD.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1. FINCA ECOLÓGICA PREMA MANDAL

Fig.1.1 Casona Finca Ecológica "Prema Mandal"

Ubicada en el Km 44 de la ruta 146 que une la comuna de Cabrero y la ciudad de Concepción se encuentra la Finca Ecológica "Prema Mandal" que en el idioma hindú significa "Tierra del Amor". Sus hermosos senderos y su pozo, que está ubicado al lado de una pequeña colina, es una réplica del lugar de nacimiento de Krishna hace cinco mil años, la encarnación de la Suprema Personalidad de Dios, de acuerdo a sus principios religiosos; hermosos jardines rodean el riachuelo que cruza la finca.

En el lugar viven 2 matrimonios. Los monjes que viven ahí, son muy dedicados, gozan de un ambiente de paz y tranquilidad teniendo a Dios como centro.

Su disciplinado monje "Arsam Maharaj", junto al encargado de la finca, Prabhu Vaisnava Pati Das, cuidan que el lugar sea llevado con todo el orden y cuidado que es necesario para una mayor comodidad.

En el mes de abril se realizó una visita a la Finca Ecológica Prema Mandal con el objetivo de conocer sus costumbres y compartir con la comunidad.

La religión que siguen quienes forman parte de la comunidad se llama Brahma Madhava Gaudiya Sampradaya, o Vaisnavismo Gaudiya, más comúnmente conocido como Hare Krisna, debido al mantra que sus devotos cantan regularmente, se origina en La India, y tiene una profunda relación con el "Yoga", tanto así que en la práctica devocional en su conjunto, lectura, canto, meditación, repetición de mantras, ofrecimiento de los alimentos y cuidado de las deidades, se considera una forma del yoga: el Bhakti Yoga o yoga de devoción.

¿Qué es el yoga?

Fig. 1.2 “Bhaktra Prya Devi Dasi”
Integrante de la Finca Ecológica Prema Mandal/Facebook

Yoga significa “unión” y corresponde a una tradicional disciplina física y mental que se originó en la India. La palabra se asocia con prácticas de meditación en el hinduismo y en el budismo. Es una de las técnicas de relajación más famosas y más practicadas. Lo que persigue el yoga es purificar el cuerpo, el espíritu y la mente. La disciplina se compone de asanas (posturas), pranas (respiración), mudras (gestos) y dristi (focos de atención), los que en conjunto están orientados a ayudar a la limpieza física del cuerpo en lo digestivo y respiratorio, equilibrar las energías, y enfocar la mente en lo trascendental. La relajación y el control de la ansiedad vienen como consecuencia de todo o anterior, pero en ocasiones se ha trivializado la disciplina, poniendo estos resultados como secundarios en el centro de la práctica. Así también ha ocurrido con su enfoque en alcanzar una flexibilidad física extrema, casi acrobática, cosa que se aleja mucho de su sentido original.

Esto es relevante, pues las características del espacio diseñado deben ser acorde a la esencia original del yoga.

Fig.1.3 Voluntariado de bio-construcción en la Finca Prema Mandal

Ellos se dedican a trabajar en equipo, y es una comunidad muy abierta a todas las personas que lleguen ahí, ya sea para hacer trabajos de voluntariado, practicar el yoga u otros rituales de espiritualidad y, además, para conectarse con el medio ambiente y con el hermoso paisaje que esta finca ecológica ofrece.

Fig. 1.4 Lugar donde se realizan las reuniones, ceremonias, etc.

Fig. 1.5 Santuario Eco Yoga Park.

Fig. 1.6 Voluntarios cocinando en la Finca.

Fig. 1.7 Vaca rescatada de un matadero.

1.2. HISTORIA DE LAS CONSTRUCCIONES CON FARDOS DE PAJA

1.2.1. Las primeras construcciones

El desarrollo de la construcción con fardos de paja se inició con la introducción de las maquinas enfardadoras en los Estados Unidos en el siglo XIX: entre los años 1861 y 1866 se produjeron fardos de heno para los caballos militares durante la guerra civil americana; en 1872 se menciona una enfardadora impulsada por caballos; y alrededor de 1884 existían enfardadoras a vapor.

Las primeras casas de fardos de paja documentadas son de Nebraska, de regiones con madera escasa. Probablemente concebidas como provisorias, sirvieron de alojamiento para los trabajadores agrícolas y resultaron ser duraderas y cómodas. Sobre el año 1886 se construyó una escuela de un aula cerca de Bayard, Nebraska. Estos edificios de fardos de paja fueron construidos sin estructura de madera, de modo que el techo descansaba directamente sobre los muros de fardos, posteriormente conocido como "Método Nebraska".

Las casas de fardos de paja más antiguas de construcción portante fueron construidas entre 1900 y 1914 y ampliadas cerca de 1940. Esta técnica encontró la mayor difusión entre los años 1915 y 1930, donde en aquella época llegaron a existir cerca de setenta edificios.

Fig. 1.8 Fawn Lake Ranch, Hyannis, Nebraska, 1900-1914

La casona "Burrit Mansion" (fig. 1.9) fue construida en Huntiville, Alabama, en el año 1938 y es, probablemente, uno de los primeros edificios en los Estados Unidos de 2 pisos con estructura de madera y relleno de fardos de paja. Un total de 2200 fardos fueron utilizados para los muros, entrepiso y techumbre y al día de hoy es conservado como un museo.

Fig. 1.9 Burrit Mansion, Huntiville, Alabama 1938

Con el fin de la crisis económica mundial de 1929, y el desarrollo de la construcción industrializada, a mediados de los años treinta la construcción con fardos de paja se estancó.

En Europa también se construyeron algunas edificaciones con fardos de paja. En Montargis, Francia, se construyó la “Maison Feuillette” (fig. 1.10), una construcción de entramado de madera con rellenos de fardos de paja reconocida como la más antigua de Europa y se mantiene en pie hasta el día de hoy.

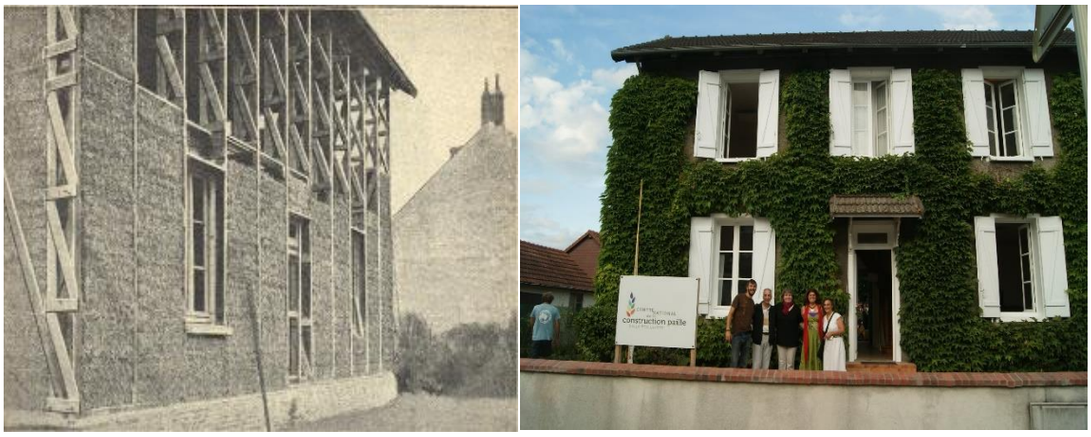


Fig. 1.10 Maison Feuillette, Montagris, Francia, 1921

En los años 80 se propuso en la antigua República Democrática Alemana (RDA) construir establos para animales (fig. 1.11) con fardos de paja, incluso antes que se desarrollara la moderna construcción con fardos de paja en los años 80 en los Estados Unidos y mucho antes de que llegara a Europa, el arquitecto Rudolf Doernach construyó, en 1979 en Hennef-Süchterscheid, Alemania, un edificio de estructura de madera rolliza, cuyos muros fueron aislados con fardos de paja. El edificio no llamó mucho la atención y fue desconocido en el movimiento ecológico internacional, tal vez porque los fardos no fueron estucados sino revestidos con tablas de madera de corteza lo que provoco su descomposición dado que fueron cubiertos por laminas que no permitían la difusión del vapor dando lugar a áreas con indicios de descomposición, por lo que después de algunos años los fardos fueron reemplazados por muros convencionales.

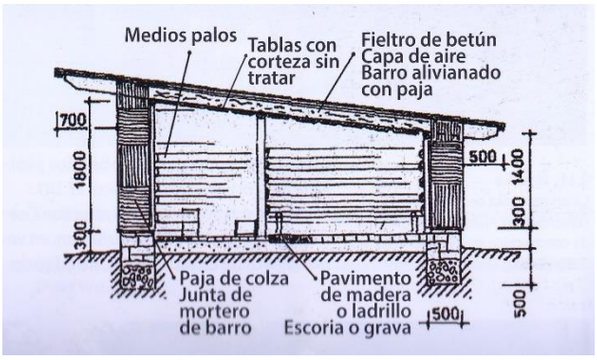


Fig. 1.11 Establos de fardos de paja en la antigua RDA

1.2.2. El renacimiento de las construcciones con fardos de paja

EN EE.UU.: A finales del siglo XX se editó una serie de documentos en los Estados Unidos que provocó el renacimiento de la construcción en fardos de paja y donde no solamente se promocionó el sistema portante, sino que se usaron los fardos de paja como

relleno para las estructuras de madera. Desde el año 1993, se publica la revista trimestral "The Last Straw - The journal of straw-bale construction". Desde ese entonces, en Estados Unidos fueron construidos edificios de fardos de paja, especialmente en el suroeste del país donde se promulgaron reglamentos especiales. La primera norma oficial fue publicada en el año 1991 en Nuevo México, EE.UU. A partir de los años 90 se realizaron investigaciones acerca del comportamiento térmico y ensayos ante el fuego, también sobre la resistencia estructural al viento y los terremotos. En los años 80 se llevaron a cabo los primeros talleres para construir edificios experimentales tanto en Canadá, Inglaterra y EE.UU. En 1993 se llevó a cabo la primera conferencia internacional en EE.UU. sobre la construcción en fardos de paja lo que llevo a la fundación del "National Straw Bale Research Advisory Network", lo que promovió este método a distintos lugares y a masificarse a Europa y Australia.

EN EUROPA: En Escocia se realizó la primera conferencia de eco-aldeas en Findhorn, en la cual David Eisenberg ofreció un taller sobre la construcción con fardos de paja, y más tarde en los talleres guiados por Martin Oehlmann y Harald Wedig durante los que se construyeron las primeras construcciones con fardos de paja. En 1998 se celebró la primera reunión europea de construcción con fardos de paja en Plogonven en la Bretagne con más de 50 participantes. En Alemania, la primera casa de fardos de paja aprobada con muros no portantes fue construida en el año 1999 por el Arquitecto Mathias Böhnisch. La primera construcción con fardos de paja portantes se construyó en el 2000 en la Universidad de Kassel, bajo la dirección de Gernot Minke y Dittmar

Fig. 1.12 La primera casa de fardos de paja construida en Alemania con permiso de construcción en Windeck-Werfen, 1999 (Rut y Matthias Bönish)

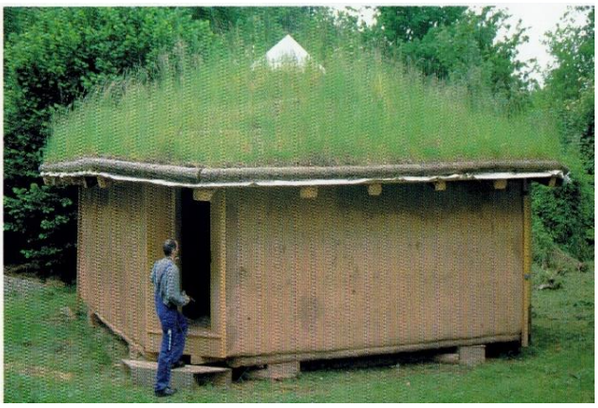


Fig. 1.13 Edificio experimental con muros portantes de fardos de paja, Universidad de Kassel, Alemania, 2000

Fig. 1.14 Club 99, Sieben Linden, Alemania, 2001 (Börn Meenen Martin Stempel)

Fig. 1.15 Casa de muros portantes cerca de Trier, Alemania, 2002-2005 (Peter Weber)

Hecken. En 2001 hizo noticia el edificio residencial “Club 99” en la eco-aldea “Sieben Linden” cerca de Poppau, levantado completamente en autoconstrucción y sin herramientas eléctricas. En 2002 se fundó la Asociación Alemana de Construcción con fardos de paja en el mismo lugar. La primera construcción de muros portantes de fardos de paja con gran formato fue realizada en 2002, por el agricultor y contratista Peter Weber en Trier y fue aprobada posteriormente en 2005.

En 2004 se construyó una cúpula no portante de fardos de paja en el Westerwald, bajo la dirección de Gernot Minke para un estudio de grabación. En 2006/2007 se levantó “Strohpolis” en Sieben Linden, una casa multifamiliar de 3 pisos de fardos de paja.

Fig. 1.17 Casa multifamiliar "Strohpolis", Sieben Linden, 2007 (Dirk Schamer)

En febrero de 2006, se otorgó en Alemania la primera “Aprobación General” para fardos de paja como material de construcción.

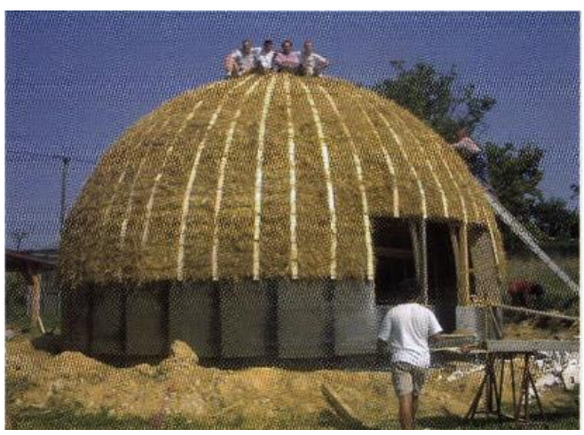


Fig. 1.16 Cúpula no portante de fardos de paja, Westerwald, Alemania, 2004 (Gernot Minke)

En Austria, con el apoyo del programa estatal “Haus der Zukunft” (Casa del futuro) del Ministerio de Transporte, Innovación y Tecnología Apropiadas en torno a Robert Wimmer, se realizaron grandes esfuerzos para establecer la paja como material aislante de alta calidad. Hoy se construyen casas de

fardos de paja con alto grado de prefabricación. Destacan, además, los proyectos “S-House” en Böheimkirchen y el edificio de tipo Passivhaus en Tattendorf. En Austria se han construido más de 120 edificios de fardos de paja.

Fig. 1.18 S-House, Edificio piloto para el uso de materiales renovables, Böheimkirchen, Austria, 2005 (Georg Scheicher, GrAT)

Desde 1989 y hasta el 2011, las activistas de fardos de paja del grupo Amazon Nail, bajo la dirección de Barbara Jones trabajaron en Irlanda e Inglaterra. En 1998 Barbara Jones construyó la primera casa de dos pisos con muros portantes de Irlanda donde hoy en día, hay más de 700 edificios de fardos de paja.

En Dinamarca se realizó, en 1998, un proyecto piloto en Hurup Thy financiado por el Ministerio Danés de Construcción, lo que ha influido significativamente en el desarrollo de la construcción con fardos de paja en Escandinavia. En Noruega, ya en 1956, fue construida una casa con fardos de paja portante y a final del siglo XX había más de 25 casas, la mayoría diseñadas por Rolf Jacobson.

En Francia, hoy existen más de 4000 y en Gran Bretaña cerca de 2000 edificios de fardos de paja.

En Bielorrusia se construyó una colonia de casas de fardos de paja para refugiados de Chernóbil que fue galardonada en el año 2000 con el “World Sustainable Energy Award”.

Muchas más casas han sido construidas de fardos de paja en este país; solo a través de programas estatales fueron construidas más de 200 casas. (Minke & Krick)

1.3. INCORPORACIÓN AL SISTEMA NORMATIVO

En Latinoamérica la construcción con fardos de paja sigue siendo muy desconocida por la mayoría de la población, y para aquellos que tienen alguna idea, aparece como una opción apartada de la realidad constructiva y de los marcos normativos. En cambio, la realidad es distinta en otras partes del mundo sobre todo en Estados Unidos y en Europa donde la construcción con fardos de paja está en constante avance e innovación.

Poco a poco la paja como material constructivo se va haciendo un espacio en el rubro de la construcción con el crecimiento en cuanto a cantidades de edificios construidos en todo el mundo y además en el ámbito normativo.

Garantizar la calidad constructiva de los edificios mediante la aplicación de la normativa, es un factor a tener en cuenta cuando se trata de buscar alternativas más ecológicas y sanas para las personas. Por eso es que es vital la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías, que permitan alcanzar todos los estándares de calidad, seguridad, sostenibilidad y de salud.

Actualmente en Estados Unidos, Bielorrusia, Francia, Australia y Alemania tienen una normativa específica sobre la construcción con fardos de paja que forma parte de los documentos de sus respectivos códigos técnicos, en otros países como Holanda, Austria, Dinamarca, el Reino Unido, Irlanda, Nueva Zelanda, Mongolia o Canadá no tienen referencia específica que formen parte del código técnico de la construcción, pero cuentan con diferentes publicaciones y documentos oficiales que respaldan y dirigen de alguna manera a una metodología constructiva más estandarizada para la construcción con fardos de paja e incluso regulan las dimensiones y características de los fardos de paja como en el caso de Austria. Este tipo de base junto con ensayos y certificaciones son suficientes para construir con paja en estos países de manera completamente legal.

Como pioneros en la construcción con fardos de paja también resulta lógico que los primeros en desarrollar una normativa constructiva para este método fuera Estado Unidos. Este primer intento de regularización constructiva comenzó a modo de proceso de desarrollo en 1980, pero hasta 1996 no se consolido como documento legalizado, a partir de este código se comenzó a construir en otros países cuya normativa no impedía la construcción con paja, pero tampoco la consideraba en su código, esta publicación del apéndice de construcción con fardos de paja ha sido la base para la realización de nuevos códigos en otros países.

El rubro se está profesionalizando gracias a las actividades de varias empresas y especialistas.

En Chile actualmente se sigue sin contar con una norma específica para la construcción de fardos de paja, aunque tampoco se encuentra alguna restricción a la hora de realizar construcciones con este tipo de material.

Por otro lado, ha habido ensayos de resistencia de muros con fardos de paja en Chile.

La actual normativa de construcción en Chile exige la comprobación técnica de las cualidades Físicas de los elementos que conforman el muro para permitir su uso en todo el país, de esta forma en el año 2014 se construyeron 8 probetas para realizar 4 ensayos (de transmitancia térmica, de resistencia al fuego y de carga horizontal y vertical) para validar un nuevo sistema constructivo en Chile.
Para ese estudio los fardos poseen una densidad aproximada de 90 kg/m^3 y dimensiones de 1 m x 0,45 m x 0,35 m, aproximadamente. La estructura confinante se compone en su totalidad por madera de 15 mm. Los elementos verticales se distancian al ancho de dos fardos de paja y se componen de dos pies derecho distanciados a 0,30 m a eje en sentido perpendicular al muro, con travesaños de 0,25 m. los elementos horizontales se configuran de manera similar, incorporando travesaños de 0,25 m cada 0,43 m al eje. Por la cara interna de estos componentes verticales y horizontales se refuerza con placa OSB de 15 mm. Sobre las caras del muro se aplica un primer revoque de imprimación en base a tierra arcillosa de alta plasticidad y arena de río, en proporción 1:1, el cual debe penetrar 3 cm dentro del fardo de paja. Posteriormente, una vez seca la capa anterior, se aplica un segundo revoque, arena y paja de trigo picada en proporción 1:2:1, con un espesor de 3 cm interior y 4 cm exterior. Se completa el muro con un último revoque, arena en proporción 1:3 al cual se le agrega 10% de cal hidratada a la mezcla, con un espesor de 1 cm tanto interior como exterior. EL ancho total del muro es de 44 cm.

1.3.1. Ensayo de Transmitancia térmica (NCh851:2008)

Este estudio fue realizado en los Laboratorios del Centro de Investigación de Tecnologías de la Construcción (CITEC) de la Universidad del Bio-Bio, con el objetivo de precisar la resistencia térmica del sistema constructivo, de tal forma de poder cumplir con las exigencias de las 7 zonas térmicas en las cuales está dividido Chile según la normativa actual. El muro de prueba se construye dentro de un bastidor determinado de 1,38 x 1,54 m, el cual, después se introduce dentro de una termocúpula que registra la Transmitancia térmica (U), la que a su vez permite conocer la resistencia térmica (Rt) de una solución constructiva al dividir el numero 1 por el (U). La solución ensayada solo fue a partir de un fragmento de muro, lo cual no incluyó elementos de madera ni placas, solo los fardos de paja y los revoques en tierra cruda.

ZONA	TECHUMBRE		MUROS		PISOS VENTILADOS	
	U W/m²K	Rt m²K/W	U W/m²K	Rt m²K/W	U W/m²K	Rt m²K/W
1	0,84	1,19	4,0	0,25	3,60	0,28
2	0,60	1,67	3,0	0,33	0,87	1,15
3	0,47	2,13	1,9	0,53	0,70	1,43
4	0,38	2,63	1,7	0,59	0,60	1,67
5	0,33	3,03	1,6	0,63	0,50	2,00
6	0,28	3,57	1,1	0,91	0,39	2,56
7	0,25	4,00	★0,6	★1,67	0,32	3,13

Fig. 1.19 Transmitancia térmica (U) y resistencia térmica (Rt) mínimos de la envolvente, según las 7 zonas correspondientes al proyecto en los planos de zonificación térmica del Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

Resultado

Los resultados de este estudio térmico fueron de una resistencia térmica (Rt) de 6,67 m^2*k/W y una Transmitancia (U) de 0.151 W/m^2*k; resultados que sobrepasan con creces el requerimiento de las 7 zonas térmicas de Chile, el cual debe ser mayor a una Rt de 1,67 m^2*k/W y menor a un U de 0,60 W/m^2*k. (CITEC UBB, 2014)

Fig. 1.20 Ensayo de transmitancia térmica para muro de fardos de paja

1.3.2. Ensayo de carga horizontal (NCh802:1971)

El estudio fue realizado en los Laboratorios de CITEC de la Universidad del Bio-Bio y buscó calcular la máxima carga horizontal que puede soportar el muro. Se construyeron 3 probetas de ensayo de un ancho de 2 metros de largo x 2,4 metros de alto x 0,35 metros de ancho, sin revestimiento en tierra. Las probetas fueron sometidas a esfuerzos en la parte lateral del muro por medio de un pistón que le aplica cargas en un intervalo de 5 minutos,

aumentando gradualmente la fuerza hasta el colapso estructural del muro de ensayo. Los resultados se promediaron entre todas las probetas ensayadas.

Resultado

El sistema constructivo soporta en su alto de 2,4 m un total de 400 kg aplicado lateralmente, lo cual no fue tan positivo ya que se estimaba pudiera soportar 700 kg; sin embargo, la solución es colocar diagonales metálicas o de madera que puedan soportar los esfuerzos horizontales.

Fig. 1.21 Ensayo al corte y compresión para muros de fardos de paja.

1.3.3. Ensayo de carga vertical (NCh801:2003)

Realizado también la colaboración del CITEC de la Universidad del Bio-Bio y tuvo como objetivo calcular cuanta carga soporta un muro aplicada en la parte superior de la probeta de ancho 2 m de largo x 2,4 m de alto x 0,35 m de ancho, sin revestimiento en tierra. El estudio también requirió la construcción de 3 muros los cuales se sometieron a un peso controlado en la parte superior del muro por medio de un pistón que le aplica cargas en un intervalo de 5 minutos, aumentando gradualmente la fuerza hasta el colapso estructural del muro de ensayo. Los resultados se promediaron entre todas las probetas ensayadas.

Resultado

El sistema constructivo soporta en su largo de 2 metros de un total aproximado de 18.000 kg fuerza, lo cual es muy positivo cuando se calcule el peso de una vivienda. El resultado significará que el calculista del proyecto podrá suponer una construcción de hasta 2 pisos y una techumbre tan pesada como de arcilla cocida o la teja colonial.

1.3.4. Ensayo de resistencia al fuego (NCh935/1:1997)

Este estudio fue llevado a cabo en el Laboratorio IDIEM de la Universidad de Chile y tiene como finalidad determinar el retardo al fuego en minutos de un muro de construcción. Se construyó un muro de ensayo de medidas 2,2 m de largo, 2,4 m de alto y

0,42 m de ancho. La solución ensayada incluyó todos los elementos constituyentes del muro: madera aserrada, placas de madera y terminación de tierra. El muro se introduce para su ensayo dentro de un bastidor, cuya cara interna queda adentro de un horno, el cual quema de forma controlada la probeta. El ensayo se detiene en el momento que la llama de fuego traspasa el muro o cuando la emisión de gases o temperatura supera los límites establecidos por la norma o en último caso cuando se sobrepasa el tiempo controlado para el ensayo.

Fig. 1.22 Ensayo de resistencia al fuego para muro de fardos de paja

Resultado

El Ensayo realizado en el IDIEM constató un retardo de 120 minutos a la acción del fuego (F-120), lo cual significó lo máximo del estudio contratado, pudiendo haber logrado resultados superiores, sin embargo, F-120 se considera la resistencia de un muro cortafuego, lo cual permite construir cualquier tipo de muro, considerando las exigencias F-30 para casas sobre 140 m^2 y solo F-15 para viviendas de menor metraje.

Fig. 1.23 Representes y exponentes del método constructivo con fardos de paja realizando un ensayo de resistencia al fuego en IDIEM U. de Chile

Para estos estudios, se contó con financiamiento de Fondos de Innovación de Innova Bio-Bio Chile y la participación de diversas instituciones y organizaciones. Los resultados permiten el ingreso de proyectos de arquitectura que usen este sistema constructivo en cualquier Dirección de Obras Municipales del país, además de proporcionar los informes exigidos por el Servicio de Vivienda y Urbanismo de Chile (SERVIU) para construir vivienda social subsidiada con estos materiales.

1.4. ORGANIZACIONES EN CHILE QUE PROMUEVEN LA CONSTRUCCIÓN CON FARDOS DE PAJA

Red Chilena de Construcción con fardos de Paja

La integran un grupo de personas vinculadas a este tipo de construcción sustentable, tanto profesionales del área como aficionados. Maria Blender, arquitecta y co-fundadora de esta red, es además una especialista en eficiencia energética, edificación sustentable, arquitectura solar, física de calor y humedad en edificación, gestión de residuos, accesibilidad universal y construcción con fardos de paja.

Fig. 1.24 Logo Red Chilena de la Construcción con Fardos de Paja

¡Construcción con fardos de paja! o "CONTRUPAJA"

Es miembro de la red Chilena de Construcción con Fardos de Paja. Además de cursos y talleres, "CONSTRUPAJA" ofrece todo tipo de asesorías relacionadas con la construcción con fardos de paja: dirigidas a profesionales de la construcción o al público en general; unas más enfocadas al diseño del proyecto y otras a la ejecución de la obra. También ofrece y potencia charlas dirigidas a explicar los beneficios de la construcción con fardos de paja, a resolver dudas y a fomentar la difusión.

Fig. 1.25 Logo "CONSTRUPAJA"

Red de Construcción con Paja de habla hispana.

La "RCP" es una Asociación de España, sin ánimo de lucro, cuyo interés y actividad se centran en la divulgación e investigación de la construcción con paja.

Los objetivos de la asociación son: promover la construcción con paja, recopilar la información disponible sobre construcción paja, poseen un espacio web como plataforma de divulgación de talleres, cursos y obras, y conectan a las personas interesadas en estas técnicas, ya sean profesionales o aficionados, para crear redes de apoyo mutuo e intercambio de conocimientos.

Fig. 1.26 Logo Red de Construcción con Fardos de Paja

1.5. COSTOS DE LA CONSTRUCCION CON FARDOS DE PAJA

¿Una casa de fardos de paja es más económica que una común?, ésta es una pregunta difícil responder de manera general, ¿con que debemos comparar una casa de fardos de paja y que construcción de muro sirve de referencia? Si se comparan con el mismo valor de aislamiento térmico, claramente resulta más económico, con respecto al costo de materiales, el muro portante de fardos de paja.

En el caso de muros no portantes, influye el tipo y la posición de la estructura de madera. Un factor determinante para los costos es el tiempo necesario para revocar los fardos. Debido a que en revoques a la vista de deben aplicar, como mínimo, tres capas por lado, previo relleno de juntas y alisado de la superficie de paja, el revoque resulta más trabajoso y caro que en la albañilería.

Más económico en tiempo y costo son los revestimientos de la cara interior del muro con planchas de yeco cartón o con tableros de madera; sin embargo, se reduce la masa térmica en el interior.

Para la comparación de costos resulta también relevante si se puede considerar la autoconstrucción. Las construcciones de estructura de madera con relleno de fardos de paja, así como revoques de barro en el interior y revoque de cal o fachada ventilada por el exterior, se pueden ejecutar en gran parte con mano de obra no calificada, de tal manera que la autoconstrucción significa un alto potencial de ahorro.

Los fardos de paja son más económicos que los materiales aislantes convencionales, pero representan un porcentaje menor del costo total de la construcción.

Una comparación de costos realizada en Austria para materiales aislantes de igual valor de aislamiento térmico entregados en obra, arrojó los siguientes costos: $2,900 por cada m^2 de muro de paja de 30 cm de espesor, 5 veces este valor para el aislamiento de fibra de celulosa y 6,5 veces el precio para el aislamiento de lana de roca de 24 cm de espesor. Suponiendo el mismo costo de montaje de $17,500 por m^2 resultó para una casa de 150 m^2 un ahorro del 2,6% con respecto al aislamiento con celulosa y 3,6% con respecto a la lana de roca. No obstante, el cálculo con costos de montaje en poco realista.

El montaje de fardos de paja como aislante térmico de muros, techos y pisos en una labor que uno mismo puede realizar sin problemas. Incluye el tratamiento correspondiente a las superficies, tal como relleno, el alisado, el revoque o el revestimiento de los muros. La preparación y aplicación del revoque de barro, sin equipamiento adecuado, es muy

laborioso. Se recomienda elaborar la ejecución de estos trabajos por personal especializado en el equipamiento adecuado.

El revestimiento de los muros y el tratamiento de las superficies de revoques y revestimientos de pinturas, protectores tipo lasur (recubrimiento para madera de acción impregnante) o similares, son trabajos más aptos para la autoconstrucción y que pueden ahorrar costos.

Los propietarios deben considerar la autoconstrucción de manera sistemática desde el inicio del proyecto. Por lo general, se sobreestiman las propias habilidades y el tiempo disponible y se subestiman la cantidad de trabajo requerido. Esto puede conllevar estrecheces de tiempo y financieras, así como tensiones sociales. Por lo tanto, una estimación objetiva y sistemática de las capacidades propia es muy importante. (Minke & Krick, 2017)

1.6. SISTEMAS CONSTRUCTUIVOS PARA MUROS CON FARDOS DE PAJA

Para los muros de fardos de paja hay fundamentalmente dos diferentes sistemas constructivos:

1.6.1. Muros portantes (Método Nebraska):

El sistema portante, en la literatura frecuentemente denominado técnica Nebraska, en EE.UU. En inglés, el sistema se conoce generalmente como *loadbearing.* En este sistema constructivo, los fardos de paja soportan el techo y eventualmente los entrepisos.

Muros de fardos de paja apilados, que transfieren las cargas del techo y entrepiso sin apoyo adicional a los cimientos, fascinan por la aparente sencillez de su construcción y el ahorro del material. Por lo tanto, han encontrado una rápida propagación, con el desarrollo de las enfardadoras de paja a finales del siglo XIX en EE.UU.

Incluso hoy en día, para determinadas aplicaciones, los beneficios de ahorro de tiempo y costos son comprobables. Sin embargo, para la ejecución existen ciertas problemáticas: la mayor dependencia del clima favorable durante la fase de construcción, el limitado tamaño de la construcción (producto del comportamiento estructural de los fardos de paja) y los procedimientos de permiso de edificación. En otros países como Suiza o Austria se han construido edificios de hasta tres pisos con el sistema portante, con la aprobación de las autoridades.

El diseño tiene limitaciones debido a la esbeltez máxima recomendada de los muros (el grosor de muro debe ser de al menos 1/6 su altura), así como por la carga máxima recomendada de 20 kN/m^2 en los muros.

Mediante el uso de fardos de gran formato y sistemas híbridos, el efecto de estas limitaciones puede disminuirse.

Fig. 1.29 Ejemplo de un muro portante de fardos de paja

En los muros portantes, es importante que los fardos de paja estén fuertemente compactados y que el muro este pretensado. Esto significa que el muro debe tener una viga de amarre en la parte superior que esté conectada a los cimientos por medio de elementos de tensión. Por medio del acotamiento de los elementos de amarre se genera en el muro una pre-tensión. Idealmente, esta debería ser de tal magnitud que no se elimine

por completo al colocar las cargas de techo y nieve, así como reducirse el pretensado debido a la relajación. De modo que en el estado de funcionamiento del edificio no aparezcan daños estructurales por asentamientos posteriores.

El tensado con respecto a los cimientos pueden realizarse por medio de varillas roscadas que pasan por el centro de los fardos de paja o bien por elementos de tensión que pasen por ambos lados. Para el tensado con varillas roscadas centrales se deben “enhebrar” los fardos, lo cual consume tiempo y requiere una división de las barras en varios segmentos, es por eso que esta técnica hoy en día no se utiliza mucho. Bajo ciertas condiciones desfavorables se podría formar condensación en las barras con riesgo de generación de moho. Más fácil resulta el tensado con correas. Aquí se debe tener en cuenta que un tensado uniforme es difícil de controlar y las correas pueden molestar en el tratamiento de la superficie.

Numerosos experimentos con muros con diferentes materiales de revoque, muestran que las capas de revoque contribuyen considerablemente a la transferencia de cargas. Dado que las calidades estructurales de las capas de revoque no son fáciles de determinar, en algunos países no está permitida su consideración en el cálculo estructural, así que el arriostramiento horizontal de las estructuras de muro portantes debe proveerse de otra manera, sin considerar el aporte de los fardos de paja y el revoque. (Minke & Krick, 2017)

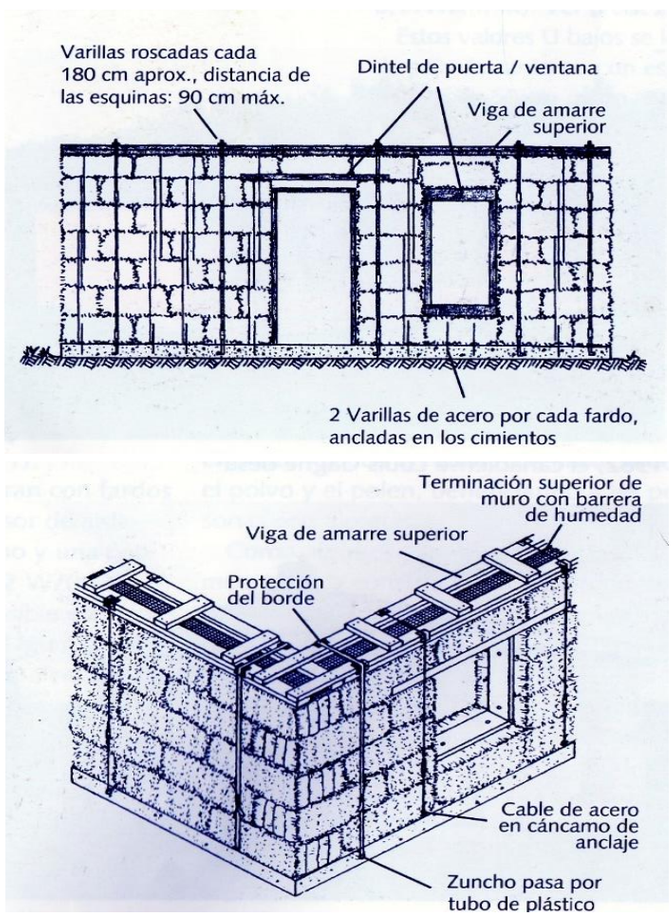


Fig.1.30 Pretensado de muros de fardos de paja portante

1.6.2. Muros no portantes

En el sistema no portante (*en inglés: non loadbearing* o *in-fill bale walls)* una estructura adicional asume el soporte de las cargas de techo y la estabilización de los muros, dejando los fardos de paja sin función estructural, solo como relleno y aislamiento. En la mayoría de los edificios, el sistema portante es de madera, en forma de entramado o estructura de madera tipo poste y viga.

Fig. 1.27 Construcción de casa con sistema no portante

Fig. 1.28 Ejemplo de muro no portante con paneles de madera y aislamiento de fardos de paja

Otras posibilidades son la construcción de paneles de madera, o bien muros de madera maciza, donde los fardos de paja se instalen por la cara exterior de un muro portante de madera. Este sistema se presenta también cuando se instalan fardos de paja como aislación exterior en la rehabilitación energética de un edificio existente.

En principio, también es posible rellenar estructuras de hormigón o de acero con fardos de paja. Sin embargo, se debe poner especial atención a los posibles puentes térmicos y el consecuente riesgo de problemas de humedad y daño.

En 1982, el canadiense Louis Gagné desarrolló un sistema de muro portante (*mortared-bale matrix system*) que en la literatura también se conoce como técnica de Gagné.

En esta técnica se colocan los fardos como si fueran ladrillos, uno encima de otro, con juntas de mortero de cemento, de modo que se conforma un esqueleto de juntas de mortero verticales y horizontales, que asume total o parcialmente la función estructural. Debido a los puentes térmicos que se generan, esta técnica no se ha impuesto y no se recomienda.

A continuación, se describe el método de “muros portantes”, que es el que utilizaremos en la realización del proyecto para la comunidad Prema Mandal.

1.7. BALANCE DE CO_2 Y CONTENIDO DE ENERGÍA PRIMARIA

La producción de los materiales de construcción demanda energía. Cuanto más sencillo es el proceso de manufactura de un material, menos energía se utiliza para su producción. Materiales de construcción naturales como tierra, piedra o madera contienen significativamente menos energía de producción que los materiales hechos de forma industrial, como los metales, plásticos y cementos. La energía requerida para producir un material se conoce como el contenido de energía primaria.

El contenido de energía primaria se refiere *"... a todos los procesos de fabricación hasta la entrega del producto terminado. El criterio solo considera la energía de fuentes no renovables. Los contenidos energéticos de la madera, virutas de madera, agua, sol, etc. no se consideran."* [Kohler/Klingele (ed.) 1995]. De este modo, el contenido de energía primaria describe la cantidad de energía no renovable requerida para producir un producto (de construcción). No se toma en consideración la energía solar almacenada en forma de carbono, por ejemplo, en madera o paja, tampoco la energía necesaria para el transporte de los materiales y productos a la obra ni la energía utilizada en el proceso constructivo. Durante el crecimiento, la paja, como cualquier otra planta, capta CO_2 (dióxido de carbono, una molécula gaseosa con un átomo de carbono y dos átomos de oxigeno) del aire mediante la fotosíntesis. El carbono se incorpora en la estructura de la planta y el oxígeno se emite al aire. Después de morir, la planta se descompone. En este proceso, el carbono se oxida con el oxígeno del aire. Se genera la misma cantidad de CO_2 que la planta ha absorbido en la etapa de crecimiento. De esta manera, el proceso es neutral en CO_2. Si se quema la planta, el proceso es el mismo con la diferencia que la oxidación es muy acelerada.

Mediante el uso de la paja como aislante se saca la paja de este ciclo natural, debido a que el carbono retenido en la paja no es liberado a la atmosfera mediante combustión o descomposición. Así una casa de paja se convierte en un sumidero de carbono de aproximadamente 42%. Una tonelada de paja almacena entonces 420 Kg de carbono. De esta manera, durante el tiempo de uso de la paja, la atmosfera es liberada de aproximadamente 1,5 Kg de CO_2 por cada Kg de paja en la edificación.

Las emisiones de CO_2 evitadas podrían ser contabilizadas con un valor negativo. Pero el balance de CO_2 solo es correcto si este valor se encuentra al final de la vida útil de la paja. Si después del uso, se quema la paja (o se convierte en compost), debe ser considerada como un combustible fósil porque el CO_2 ya ha sido bonificado en el comienzo de la fase de uso del edificio.

En la figura se representa la proporción de contenido de energía primaria de cada etapa del proceso de producción de fardos. Lo sorprendente es el alto porcentaje de hilo. Esto no se debe a que el hilo de enfardar tenga un contenido muy alto de energía primaria, sino más bien al contenido extremadamente bajo de las otras partes del proceso. (Minke & Krick, 2017)

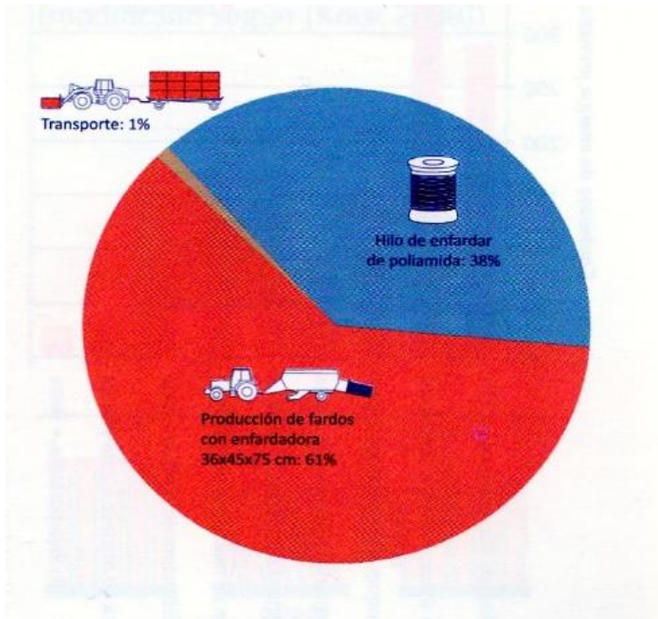


Fig. 1.31 Proporción del contenido de energía primaria de los procesos. (Fardos pequeños, escenario favorable) [Krick 2008]

CAPÍTULO 2: CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE CON FARDOS DE PAJA

2.1. LA PAJA COMO MATERIA PRIMA

La paja corresponde a los tallos de los cereales trillados (trigo, centeno, cebada, avena, arroz, mijo) o de cultivos de fibras (lino, cáñamo). La paja es una materia prima renovable producida mediante la fotosíntesis, a partir de energía solar, agua y minerales de la tierra. Se compone de celulosa, lignina y sílice y muestra un exterior ceroso y repelente al agua.

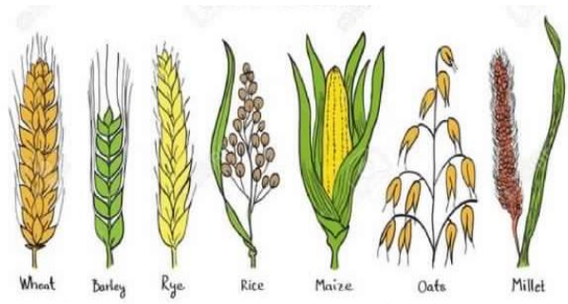


Fig. 2.1 Cereales de donde se obtiene la paja

La paja se descompone muy lentamente debido a su alto contenido de sílice. Por lo tanto, a menudo se utiliza en la agricultura ecológica para aflojar el suelo, también es usada como cama en los establos o como alimentación suplementaria del ganado en invierno, ocasionalmente es usada como combustible o para la producción de paneles de paja.

Para la fabricación de fardos de paja para la construcción, se recomienda principalmente la paja de trigo, de espelta y de centeno. La paja de cebada y de avena es menos recomendable debido a que es menos estable.

Desde hace muchos siglos en Europa y en toda América, se utiliza la paja para techar, como agregado en la construcción con barro se utiliza la paja desde hace miles de años, a fin de mejorar el aislamiento térmico y reducir el agrietamiento del material durante el secado.

La naturaleza y la calidad de la paja son de vital importancia para las propiedades de los fardos, por lo que, para la producción de éstos, es preferible la paja larga con tallos intactos. (Minke & Krick, 2017)

2.1.1. Corte y trilla

El cereal se cosecha mediante una cosechadora, en la etapa de madurez, es decir, cuando el grano es duro y seco, la paja esta amarilla y quebradiza. Los tallos son cortados por encima del suelo, mediante la plataforma de corte de un acho de hasta 10 m y transportados al mecanismo de trilla. Dependiendo del tipo de transporte de la paja por la trilladora, se distingue entre cosechadoras tangenciales y axiales.

Fig. 2.2 Cosechadora de cereales

En las cosechadoras tangenciales, el cereal se transporta entre el tambor y la trilla y el canasto de trilla. Barras batidoras fijadas en el tambor de trilla golpean la paja y luego se sueltan los granos de las espigas. Cuanta menos distancia haya entre el canasto y el tambor de trilla, mayor es la proporción de granos que son liberados de las espigas, y más se daña la estructura de los tallos. Después de pasar a través de la trilla, el cereal alcanza un separador, donde se separan los granos restantes de la paja. El grano entra en un depósito de grano y la paja cae detrás de la cosechadora formando hileras sobre el campo. Algunas de las cosechadoras más grandes, trabajan con trilladoras axiales. En estas, la paja rodea el tambor de trilla varias veces mientras las batidoras pujan la paja de las espigas. Es un proceso suave para la paja, pero los tallos se dañan en su estructura, de modo que casi solo queda paja cortada. También existen trilladoras combinadas axial-tangenciales, donde la unidad axial se hace cargo de la función del separador. El impacto de estas trilladoras combinadas en la calidad de los tallos es igual a la de las trilladoras axiales.

Debido a que los tallos intactos mejoran la resistencia del fardo, la paja para fardos de construcción debería ser trillada con máquinas de flujo tangencial.

2.1.2. Compactación de fardos de paja

Para la producción de fardos de paja para la construcción, se utilizan enfardadoras rectangulares de fardos pequeños y grandes. Los fardos provenientes de rotoenfardadoras se pueden re-enfardar. La altura y el ancho de los fardos de paja se determinan por las dimensiones del canal de compresión y no se pueden cambiar. La longitud es variable dentro de ciertos límites, (la siguiente tabla muestra las dimensiones típicas de fardos de pajas.)

Tipo de maquina	Dimensiones de fardos (cm)		
	Altura	Ancho	Largo variable
Enfardadora de fardos rectangulares pequeños	31 (30)	40 (41)	30-120
	36	49 (48)	50-120
Enfardadora de fardos rectangulares grandes	50	80	70-240
	70	80	120-250
	70	120	90-300
	90	120	100-270
	100	120	100-300
	130	120	100-270

Fig. 2.3 Muestra las dimensiones típicas de fardos de paja

Con pequeñas enfardadoras se pueden producir, según los fabricantes, fardos con una densidad de hasta 120 Kg/m^3. Las dimensiones de los fardos varían dependiendo de la máquina, alrededor de 36 x 49 x 50 a 130 cm. Típico es el amarre doble.

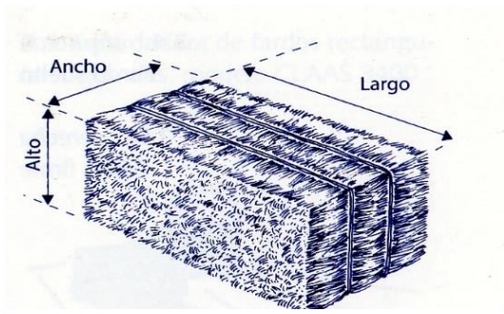


Fig. 2.4 Dimensiones de un fardo de paja

Las pequeñas enfardadoras hoy en día se utilizan sobre todo en granjas pequeñas. Las ventas han disminuido drásticamente. Muchos fabricantes han cesado la producción en favor de máquinas de fardos rectangulares grandes y fardos cilíndricos.

Fig. 2.5 Enfardadora de fardos rectangulares, modelo Case SB531

Enfardadoras rectangulares grades (“enfardadora prismática gigante”, “Big Baler”, figura 2.5) representan el desarrollo más reciente. Con ellas se logran densidades de hasta 220 g/m^3, en dimensiones entre 50 x 70 x 80 a 120 cm y 120 x 130 x 100 a 300 cm. Los fardos llevan de 4 a 6 amarres. Son utilizados principalmente por empresas grandes, cooperativas o contratistas agrícolas en los EE.UU. los llamados 3-String-Baler son habituales; ellos producen fardos con tres cuerdas y dimensiones de, por ejemplo, 41 x 56 x 46 a 130 cm. (Minke & Krick, 2017)

Fig. 2.6 Fardo suelo

Fig. 2.7 Fardo firme

2.2. FARDOS DE PAJA PARA LA CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE CALIDAD

Para utilizar los fardos de paja como material de construcción, éstos deben las tener las siguientes propiedades:

- Amarres de cordel de plástico o de alambre.
- Cantos bien definidos.
- Estructura de tallos lo más intacta posible (cosecha con trilla tangencial).
- Color dorado (no gris o negro).
- Sin olor a humedad.
- Estructura sólida, amarres bajo tensión.
- Humedad relativa del aire en los fardos de paja menor a 75% HR (correspondiente a un contenido gravimétrico de humedad menor al 15%)
- Densidad mínima 90 Kg/m^3. Para la construcción de muros portantes al menos 110 Kg/m^3.

Para proteger la estructura de los tallos, en la cosecha, deben utilizarse preferentemente cosechadoras tangenciales sin posterior tambor de segregación. La paja, después del corte, en lo posible, no debe ser expuesta a la lluvia. La humedad y el secado dejan la paja quebradiza. La humedad perdurable puede generar la aparición de moho, pudrición y cultivo de microorganismos descomponedores.

El amarre de hilo de sisal, sin duda, es ecológicamente positivo, sin embargo, se ha demostrado en ensayos de carga, que la resistencia de los hilos naturales es insuficiente.

Si los bordes son bien rectos y los extremos poco redondeados (figuras de arriba), en el proceso de construcción se puede ahorrar mucho trabajo, ya que se evita así ajustar los fardos y rellenar los espacios vacíos. Fardos sueltos con bordes redondos deben ser sometidos a adaptaciones complejas para poder ser utilizados en la construcción. Los trabajos necesarios son: enderezar las caras extremas de los fardos, eventualmente la re-compresión, y eliminar los tallos que sobresalen antes de revestir.

Fig. 2.8 Enfardadora gigante CLAAS Quadrant 3300

Para la producción de fardos de paja para la construcción se aplican las siguientes pautas (figura enfardadora)

- Generar hileras de tamaño uniforme (“Hilera uniforme – resultado enorme”)
- Apretar firmemente las manillas de ajuste de densidad de la prensa (“Manilla apretada – paja compactada”).
- La instalación de un estrechamiento lateral del canal aumenta la densidad de los fardos en alrededor del 4% por cada centímetro (“Canal estrecho – fardo bien hecho”)
- La estera debe estar siempre llena (“Estera llena – bala llena”).
- Conducir con velocidad alta y constante, a revoluciones normales, sobre una hilera grande y uniforme (“Velocidad dura – paca dura”)

Los fardos de paja deben cumplir con los siguientes requisitos para ser adecuados para la construcción:

1. Inspección visual: la paca es inadecuada si
   a) El amarre es de fibra natural,
   b) El fardo muestra decoloraciones,
   c) Los bordes están muy redondeados,
   d) El fardo contiene muchas hiervas, ya que por lo general las hiervas son más húmedas, menos firmes y pueden ser el punto de partida para el crecimiento del moho.
2. Examen táctil y olfativo: el fardo no es adecuado si se siente húmedo o mohoso.
3. Prueba de esfuerzo: debe ser posible ponerse de pie sin problemas sobre un fardo acostado, sin hundirse y sin que el fardo comience a tambalear en caso de movimientos, los amarres no deben soltarse.
4. Ensayo de humedad: el sensor de un higrómetro se sitúa en el centro del fardo fig. la humedad relativa del aire al interior del fardo no debe exceder el 75% (esto corresponde a un contenido gravimétrico de humedad de alrededor de 15%).
5. Densidad: la densidad debe ser de al menos 90 Kg/m^3 en las aplicaciones no portantes, mientras que en las aplicaciones portantes no debe ser menor a 110 Kg/m^3.

Los fardos de paja se deben almacenar en condiciones secas. Esto significa que no se apila directamente sobre tierra húmeda y deben ser protegidos de la lluvia. En la obra es recomendable colocarlos sobre pallets. (Minke & Krick, 2017)

2.2.1 Clasificación de la eficiencia energética

De acuerdo al "Sistema de certificación energética de viviendas" (IIT UdeC, 2009) el ahorro de 36,6% de la demanda de energía por calefacción y refrigeración, en las zonas térmicas de 3 a 5, corresponde a la clase "C" de eficiencia energética, mientras que una vivienda que cumpla con la Reglamentación Térmica (+10% / -15%) se clasifica como clase "E" (véase la siguiente figura.)

Por lo tanto, la edificación, por tener muros exteriores de fardos, mejora considerablemente su calificación de eficiencia energética, a pesar de que los otros elementos de la envolvente, como ventanas, pisos y techumbres, representan tecnologías convencionales.

Fig. 2.9 Clases de eficiencia energética de edificios según demanda de energía para calefacción y refrigeración

2.3. PROPIEDADES FISICAS DE LA PAJA

El arquitecto Jorge Broughton trabaja desde hace 20 años este material, y asegura que es una técnica muy segura frente al fuego. *"El fardo, al estar comprimido, no tiene oxígeno. Soporta dos horas el traspaso del fuego y es mucho más incombustible que la madera"*. Agrega que no presenta problemas con insectos y es muy resistente a los sismos por su alta flexibilidad. *"Todas las casas que hicimos antes del terremoto del 2010 resistieron, no les pasó nada"*, puntualizó. Diario la tercera, año 2012.

Blender destaca, además, la sustentabilidad de este tipo de material versus los materiales tradicionales que generan altos niveles de CO_2 en su fabricación. *"Es un material completamente natural, que ya es un residuo de la actividad agrícola y que lo usas para construir una casa que puedes reciclar. Al demoler tampoco generas residuos, como en el caso del hormigón o el aislapol. Los fardos, en cambio, puedes reciclarlos y devolverlos a la tierra en forma de compost".*

2.3.1. Transmisión y aislamiento térmico

Para el transporte de energía térmica existen tres mecanismos: radiación, convección y conducción de calor. Mientras la radiación de calor transmite la energía en forma de ondas electromagnéticas y penetra medios translucidos e incluso el vacío, la conducción y la convección de calor requieren de un medio.

La conducción de calor es la transferencia de calor a través de un material. Por lo general, vale que cuanto más denso sea el material, mejor se conduce el calor; y cuando más ligero sea el material, menos es la conductividad térmica, es decir, mejor su efecto aislante.

La convección es la transferencia de calor a través del movimiento de un medio fluido, como por ejemplo el agua o el aire.

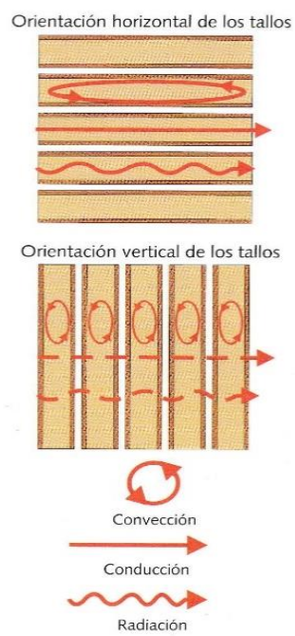


Fig. 2.10 Transporte de energía térmica en los fardos de paja.

Para el cálculo de aislamiento térmico de un elemento deben conocerse la conductividad térmica del material y el espesor del elemento. La conductividad térmica se describe mediante el coeficiente de conductividad térmica lambda (λ) con la unidad W/(m*K). Una

conductividad térmica de 2 W/(m*K) significa que, a través de un elemento con una superficie de 1 m^2, un espesor de 1 m y una diferencia de temperatura de 1 grado entre uno y el otro lado del elemento, se transfieren 2 W de energía térmica. En los fardos de paja, la conductividad térmica depende de la orientación de los tallos con respecto a la dirección del flujo de calor. Con el flujo de calor paralelo a los tallos, la conductividad térmica es mayor que en el case del flujo de calor perpendicular a la dirección de los tallos.

En Alemania según la Aprobación General de fardos de paja para la construcción (Abz 2014) se determina el siguiente valor nominal para la conductividad térmica de fardos de paja de cereales:

- Flujo de calor perpendicular a la dirección de los tallos: λ = 0.052 W/(m*K)

En comparación con los materiales aislantes sintéticos de fibra mineral, que tienen valores λ entre 0.024 y 0.045 W/(m*K), esto no parece tan favorable, pero en comparación con la madera de coníferas con λ = 0.13 W m*K) los valores son bastantes buenos.

La transmitancia térmica o valor U de un muro indica la cantidad de energía térmica que se transporta a través de un m^2 de superficie de un muro por grado Kelvin de diferencia de temperatura. Su unidad es W/(m^2*K), cuanto menor sea en valor U, menos energía se transporta y menos serán los costos de calefacción. Por lo tanto, es deseable que los elementos de la envolvente de un edificio tengan un valor U bajo.

Espesor capa de paja [m]	Transmitancia térmica del muro [W/(m²·K)]
Flujo de calor perpendicular	
0,31	0,16
0,36	0,14
0,50	0,10
0,70	0,07
0,90	0,06
1,00	0,05
1,30	0,04
Flujo de calor paralelo	
0,41	0,19
0,49	0,16
0,80	0,10
1,20	0,07

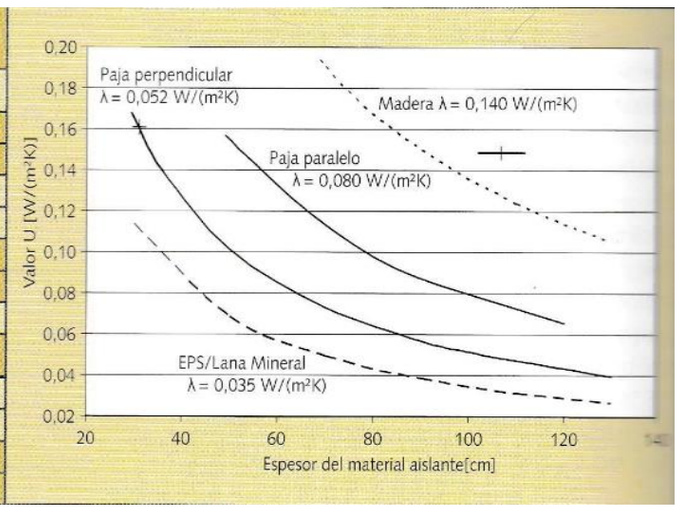


Fig. 2.11 Transmitancia térmica de muros de fardos de paja en función del espesor de la paja y de la orientación de los tallos con respecto al flujo de calor.

La fig. 2.11 muestra los valores U de una pared de fardos de paja con la siguiente secuencia de capa desde el interior al exterior: 4 cm revoque de barro, fardos de paja, 2 cm revoque de barro, revestimiento ventilado. El espesor de los fardos de paja varía. En la representación gráfica, se comparan los valores U de la paja con los valores de materiales aislantes convencionales. (Minke & Krick, 2017)

- **Almacenamiento de calor**

Para los materiales convencionales de construcción se aplica: cuanto mayor es la densidad del material, mejor se conserva el calor, pero mejor lo transmite también. Y mientras más liviano es el material de construcción, mejor es el aislamiento y peor es el almacenamiento de calor. Sin embargo, esta regla general es solo una primera aproximación. Los materiales orgánicos almacenan, con la misma densidad, aproximadamente dos veces más calor que los materiales minerales, mientras que el agua lo hace cuatro veces más.

Cada material tiene una capacidad de calor especifica *c*. Esta capacidad de almacenamiento en una constante del material que se expresa en kJ/(kg*K).

La capacidad de almacenamiento absoluta C en kJ/K de un cuerpo con volumen específico se determina utilizando la siguiente fórmula:

$$C = c * \rho * V$$

Con:

c = Capacidad calorífica especifica del material [kJ/(kg*K)]

ρ = Densidad del material [Kg/m^3]

V = Volumen del cuerpo [m^3]

Para determinar el calor almacenado utilizable Q en kJ, se multiplica la capacidad calorífica del cuerpo C por la diferencia de la temperatura entre el cuerpo y el medio ambiente:

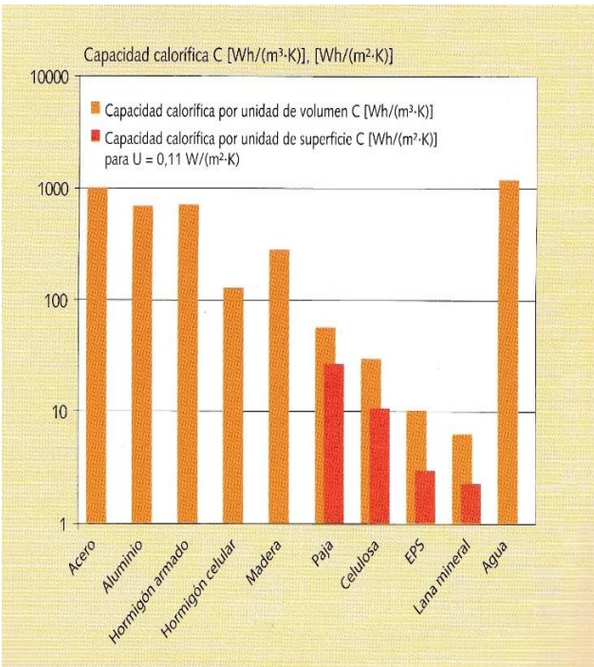
$$Q = C * \Delta T \text{ [kJ]}$$

Con:

C = Capacidad calorífica del cuerpo [kJ * K]

ΔT = Diferencia de temperatura entre el cuerpo y el medio ambiente [K]

Para la conversión Q de [kJ] a [Wh] se aplica: 3,6 kJ = 1 Wh, o bien 1 kJ = 1/3,6 Wh.



Capacidad calorífica especifica c[kJ/(kg*K)]	
Metal, ej. Aluminio, Acero	0,9 - 0,45
Mineral	ca. 1,00
Orgánico	ca. 2,00
Agua	4,20
Capacidad calorífica C[Wh/(m^3*K)]	
Acero	988
Aluminio	675
Hormigon armado	694
Hormigon celular	125
Madera	278
Paja (110 kg/m3)	56
Celulosa (55)	29
EPS (18)	10
Lana mineral (27)	6
Agua	1167
C[Wh/(m^2*K)] para U=0,15 W/(m^2*K)	
Paja (110 kg/m3)	19,3
Celulosa (55)	7,7
plystyrol (18)	2,3
Lana mineral (27)	1,6

Fig. 2.12 Capacidad de almacenamiento de calor de diferentes materiales de construcción.

En la Fig. 2.12 se muestra que la capacidad de almacenamiento de calor de la paja es muy buena en comparación con otros materiales de aislamiento térmico, pero en comparación con materiales sólidos es bastante modesta. De esta manera, por ejemplo, un muro o un techo con estructura de madera y un valor de transmitancia térmica (U) de 0,15 W/(m^2*K), al usar fardos de paja como aislante logra una capacidad de almacenamiento diez veces mayor que cuando se utilizan materiales aislantes de lana mineral. El confort térmico incrementa notablemente. (Minke & Krick, 2017)

- **Puentes térmicos**

Los puentes térmicos son puntos débiles en la envolvente térmica del edificio. En estas áreas se pierde mucho más calor que en las zonas adyacentes, es decir, el efecto térmico allí es menor. Debido al aislamiento térmico reducido en las zonas de los puentes térmicos y con temperaturas exteriores bajas, la temperatura de la superficie interior en estas zonas es menor que la de las superficies circundantes. Esto puede conducir a la condensación y favorecer el crecimiento de moho. Además de eso, el aumento de humedad en la construcción conduce el deterioro del efecto de aislación térmica, lo que hace que el problema sea aun peor.

En las paredes de los fardos de paja, surgen puentes térmicos, como por ejemplo en los encuentros de fardos no rellenos o en las uniones con maros de puertas y ventanas. Pero también la propia estructura de madera puede ser puente térmico, ya que la conductividad

térmica de la madera es de dos a tres veces más alta que la de los fardos de paja. Por lo tanto, deben reducirse o evitarse las estructuras de maderas que penetran completamente los muros de fardos de paja. (Minke & Krick, 2017)

2.3.2. Comportamiento hídrico

El comportamiento higroscópico describe la capacidad de una sustancia de absorber agua de la humedad del aire y liberarla.

La humedad relativa del aire (φ) se define como la relación entre el contenido real de humedad del aire (humedad absoluta en g de agua por m^3) y el contenido máximo de humedad del aire, la humedad de saturación (también en g/m^3). La humedad relativa de expresa en % HR.

A una humedad relativa de 1, correspondiente a 100 % HR, el aire está saturado con agua y no puede absorber más humedad. Cuanto más caliente está el aire, más humedad puede absorber. Si se enfría el aire, se aumenta la humedad relativa hasta el máximo de 1 (100% HR). Si se sigue enfriando, se produce la condensación, es decir, aparece agua en forma líquida.

Si un material se almacena durante un largo periodo de humedad relativa y temperatura constantes, se ajusta el contenido de humedad especifico en el material. Este contenido específico de humedad se llama humedad de equilibrio u [g/g] y se define de acuerdo con la norma DIN EN ISO 12571 (2000) así:

$$u = (m - m_0) / m_0$$

m = masa del cuerpo húmedo.

m_0 = masa del cuerpo absolutamente seco.

El proceso de incorporación de humedad en un material desde el aire se llama adsorción, el proceso contrario se llama desorción. Ambos resumidos por el termino sorción.

El contenido de humedad de equilibrio de un material, a temperatura constante y con diferentes humedades, se representa por una isoterma de sorción especifica de este material. Por medio de estas isotermas de sorción se puede concluir el contenido de humedad de un cuerpo a partir de la humedad relativa del aire encima o dentro del cuerpo, siempre y cuando el cuerpo se encuentre en estado de equilibrio con el aire ambiental.

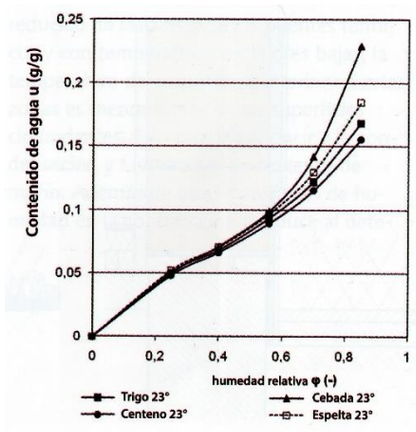


Figure 1.13 El Gráfico muestra las isotermas de sorcion de la paja de trigo, cebada centeno y espelta a una temperatura de 23 °C

Los elementos de construcción siempre deben estar protegidos contra la humedad excesiva, ya que esto puede causar daños por moho en la superficie o al interior de la construcción. El exceso de humedad, puede presentarse a partir de la lluvia directa en el exterior, por la humedad ascendente desde el suelo o por condensación de la humedad del aire interior.

Siempre se debe, independientemente del diseño, prevenir el transporte de la humedad desde el suelo hacia los muros mediante barreras horizontales.

Las construcciones de muros exteriores siempre deben tener una protección contra salpicaduras, de al menos 30 cm de altura sobre el nivel horizontal (de tierra, techos, etc.). En los muros de fardos de paja, por lo tanto, la primera hilada de fardos solo debería comenzar por encima de este nivel.

Un muro de fardos de paja, como cualquier otro muro, se ha de proteger contra las inclemencias del tiempo como la lluvia, el granizo y el viento. Esto se logra con un revoque resistente a la intemperie y libre de grietas, por las que eventualmente podría ingresar la humedad. (Minke & Krick, 2017)

2.3.3. Protección acústica

El aislamiento acústico del ruido aéreo, de los elementos de construcción, se describe cuantitativamente (en conformidad con la norma DIN 4109) con el índice global de reducción sonora R_w o R'_w respectivamente. El índice de reducción sonora de laboratorio R_w se utiliza cuando el sonido se transmite exclusivamente a través de la probeta. En caso de transmisión adicional por los flancos u otras vías, se utiliza el índice de atenuación acústica R'_w.

El aislamiento acústico de fardos de paja, con el revoque por ambos lados, es mayor que el de muros macizos con el mismo peso, debido a que la paja tiene un cierto efecto de muelle y además absorbe el sonido.

Las mediciones realizadas en un estudio de grabación en Australia con muros de fardos de paja de 45 cm de espesor mostraron, con niveles de ruido de 114 – 117 dB al interior del edificio, niveles sonoros en el exterior de 62 – 71 dB, en el rangos e frecuencia de 500 – 10.000 Hz. Esto corresponde a una diferencia de nivel de sonido de 43 – 55 dB.

El Instituto de Investigaciones Viena MA39, determinó para un muro de fardos de paja de 50 cm revestido con una cara de 3 – 4 cm de revoque de barro y en la otra cara 9 cm de madera maciza (tres capas cruzadas de abeto), un aislamiento acústico de 55 dB, según la norma austriaca ÖNORM EN20140-3. En la Universidad Técnica de Eindhoven, Holanda, los valores de aislamiento acústico de un muro de fardos de paja con un espesor de 45 cm y una densidad de 120 – 130 kg/m^3 con 2,5 a 3,5 cm de revoque de barro, fueron determinados de acuerdo a la norma ISO 140-3. La figura muestra los valores medidos en comparación con muros solidos de concreto y de ladrillos silicocalcáreos.

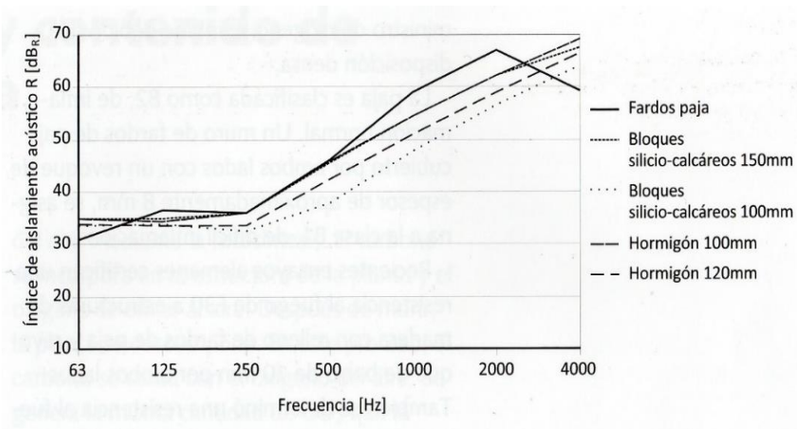


Fig. 2.14 Índice de aislamiento acústico para diferentes materiales de muro

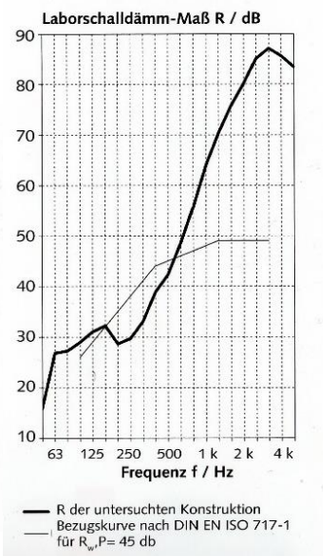


Fig. 2.15 Índice de aislamiento acústico de laboratorio para un muro no portante de fardos de paja con revoque de tierra de espesor 1 cm en ambas caras [según FASBA 2008]

El Instituto de Física de la Construcción en Oberursel midió un muro de fardos de paga de 36 cm con estucado de madera y en ambas caras revoque de barro de 1 cm de espesor y determinó el aislamiento acústico según la norma DIN EN ISO 140-1 con $R_{W,R}$ = 43 dB. Para un muro con revoque de barro de 1 cm por lado y 2 cm por el otro lado se midió $R_{W,R}$ = 44 dB. En la figura XX se puede observar que el índice de atenuación sonora es bajo a frecuencias muy bajas, pero aumenta con creciente frecuencia, a 200 Hz aumenta significativamente a más de 80 dB. (Minke & Krick, 2017)

2.3.4. Protección del fuego

Los elementos constructivos se clasifican según su resistencia mínima al fuego en minutos: F30, F60, F90, F120.

La paja suelta se incendia fácilmente. Sin embargo, los muros de fardos de paja con revoque en ambas caras tienen una resistencia al fuego de 120 minutos (F120), lo que se demostró y certificó en el ensayo realizado en el IDIEM de la Universidad de Chile en el año 2014. Pudiendo alcanzar niveles más altos. La paja comprimida en fados es mucho más difícil de encender, porque el suministro de oxígeno se inhibe debido a la disposición densa. (IDIEM, 2014)

En Alemania lo materiales de construcción se dividen en las siguientes clases de combustibilidad:

A- Materiales no combustibles.

B1- Materiales de difícil inflamación.

B2- Materiales de inflamación normal.

B3- Materiales altamente inflamables.

Los materiales de construcción para muros deben ser al menos de clase B2.

Mientas según la norma alemana DIN 4102 solo los materiales se clasifican de construcción, la norma europea EN 13501 también permite la clasificación de los productos de construcción, mediante el Single Burning Item-Test (SBI).

La paja es clasificada como B2, de inflamación normal. Un muro de fardos de paja cubierto por ambos lados con un revoque de espesor de aproximadamente 8 mm, se asigna a la clase B1, de difícil inflamación.

Recientes ensayos alemanes certifican una resistencia al fuego de F30 a estructuras de madera con rellenos de fardos de paja y revoque de 10 mm por ambos lados.

También se determinó una resistencia al fuego de F30 para muros portantes de fardos de paja estucados a ambas caras con barro de 3 a 5 cm de espesor bajo carga de trabajo. En 2014, se realizó con éxito, un ensayo de fuego de 90 minutos, según la norma DIN EN 1365, a una estructura de madera con relleno de fardos de paja verticales y cubierta en ambas caras con 10 mm de revoques livianos de cal.

En Austria se determinó, según la norma ÖNORM 3800-2, la resistencia al fuego de F90 para un muro de fardos de paja con 2 cm de revoque de barro por el interior y 2 cm de

revoque de cal por el exterior. Ensayos en los Estados Unidos (SHB AGRA Test) determinaron una resistencia al fuego de 120 minutos.

La alta resistencia al fuego de un muro estucado de fardos de paja se debe, por un lado, a la falta de ingreso de oxígeno a través del revoque, por otro lado, al hecho de que no hay suficiente oxigeno presente en el fardo por su alta densidad, lo que inhibe la propagación del fuego.

Si la capa de revoque, sin embargo, esta agrietada, se genera detrás de la grieta una capa de tallos carbonizados, lo que dificulta aún más la penetración del oxígeno, como se mostró en los experimentos llevados a cabo en el Laboratorio de Investigación para la Construcción Experimental de la Universidad de Kassel. La temperatura se llevó hasta 1000°C según la norma DIN. Incluso después de 90 minutos de tiempo, a pesar del agrietamiento, no se inició ningún incendio, solo carbonización en lo fardos de paja en la zona de fisuración.

Durante la construcción, los muros de fardos de paja sin estucar están en peligro de incendio, sobre todo cuando hay muchos tallos salientes. Por lo tanto, los fardos deben recibir la primera capa de revoque lo antes posible. (Minke & Krick, 2017)

CAPITULO 3: EJEMPLOS NACIONALES E INTERNACIONALES DE CONSTRUCCIONES CON FARDOS DE PAJA

3.1. EN CHILE

3.1.1. **Casa Coya, cerca de Machalí, VI Región**

Casa Coya está emplazada en una zona remota de la Cordillera de los Andes de Rancagua, una pequeña meseta ubicada en la ribera sur del rio Cachapoal, con amplias vistas al rio Coya y a la cordillera de los Andes, un paisaje grandioso.

Fig. 3.1

La espaciosa casa se desarrolla alrededor de un patio interior. Hacia el exterior está protegida por un alto muro de estructura de madera, relleno con fardos de paja y revocado con barro.

La fachada perimetral está en contraste de escala y de color con el interior doméstico, que ofrece un amplio rango de condiciones espaciales. De arquitectura contemporánea, combinada con materiales y elementos tradicionales de la región, así como con el uso de materiales reciclados.

Casa Coya participo en la Bienal de Arquitectura de Chile del 2010 y también participó representando a Chile en la Bienal de Venecia del mismo año.

El muro perimetral, con altura de 5 metros y sin alero protector, represento un desafío para todos los involucrados en la obra, no solo por los efectos del clima duro de la zona, sino especialmente en vista del alto riesgo sísmico. En este sentido, el revoque exterior representa el elemento de mayor exigencia.

Debido a algunos problemas en la ejecución de la casa, las diferentes capas de revoque fueron ejecutadas en distintas etapas y técnicas, lo que resultó en un espesor mayor de lo habitual. La primera capa está, por razones estructurales, reforzada con una malla electro-soldada, lo que complico la

Fig. 3.2

instalación manual del barro. El revoque de terminación se instaló con una malla-vellón. Finalmente, recibió un tratamiento hidrófobo polímero

Fig. 3.3

Las fachadas que reciben el sol se mantienen en muy buenas condiciones gracias a la acción regular de secado. Solo en la fachada sur existen sectores delicados, sobre y debajo de las ventanas, las que se demoran en secar después de las lluvias. Sin embargo, hasta la fecha no ha tenido necesidad de mantenimiento. El gran terremoto de febrero de 2010 que sacudió Chile, provocó solo unas grietas y desprendimientos menores en algunos sectores del estuco.

Fig. 3.4

Proyecto: OWAN Arquitectos, Evan Sellmyer Pruitt

Asesoría en construcción con fardos de paja: Maria Blender

Terminación: 2010

Superficie construida: 460 m^2

3.1.2. Jardín Waldorf “Casita del Bosque” en Limache, V Región

La “Casita del Bosque” nace en el sueño de levantar un jardín infantil acorde a las necesidades de los niños, hecho de materiales naturales y por un costo mínimo.

La construcción se desenvuelve en torno a un octágono entre medio de los árboles del terreno.

Ocho pilares rústicos en el centro y un muro portante de fardos de paja por el perímetro, conforman un sistema híbrido que sostiene el techo con una estructura recíproca de troncos.

El muro se levantó sobre cimientos de súper-adobe. Para enlazar los fardos verticalmente entre sí se utilizó coligue, un bambú chileno. El piso está hecho de pallets usados, instalado sobre grava compactada y revestidos con tableros de terciado. La cubierta es un techo verde.

Los muros fueron revocados con mezcla estabilizadas de barro y sobre estos, se aplicaron pinturas de arcilla e impermeabilizantes naturales. Se realizaron también trabajos artísticos de relieves.

En la ejecución participo gran cantidad de personas, muchos de ellos sin conocimientos previos. Se ofrecieron talleres para capacitar y reunir mano de obra, que permitió la creación de un ambiente de encuentro, de aprendizaje comunitario, gratitud y alegría en torno a esta pequeña obra.

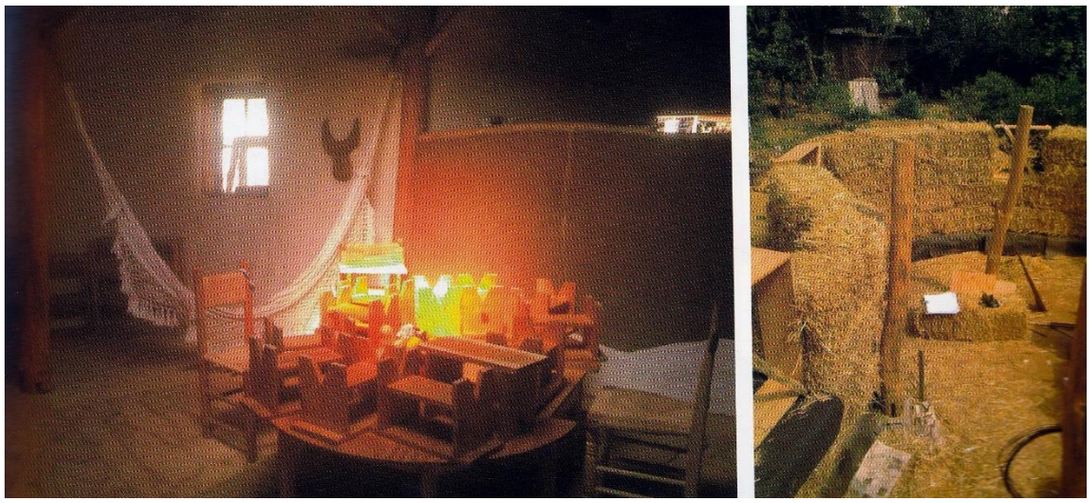


Fig. 3.5

Proyecto: Valentina Osorio y Ramón Alegría

Ejecución: Valentina Osorio, Ramón Alegría, Aníbal Ruiz y familiares, voluntarios y participantes en talleres.

Terminación: Año 2014

Superficie útil: 40 m^2

3.1.3. Casa “Muelle” en Peñalolén, Santiago

La Casa Muelle está ubicada en la precordillera de Santiago, en un exclusivo condominio y ofrece una espectacular vista de la ciudad. Está ideada como proyecto piloto para el primer proyecto inmobiliario con fardos de paja en Chile: un conjunto de 5 casas a construirse en un terreno cercano.

El proyecto está concebido bajo criterios de sustentabilidad. Según la exposición de cada fachada, se utilizaron distintas técnicas en barro y paja con una estructura de madera. Los muros perimetrales con orientación sur, este y oeste son principalmente con fardos de paja, estucados por ambas caras con barro; y se combinan con muros de quincha seca y de quincha húmeda.

Además, en la construcción se utilizan varias otras técnicas sostenibles, tales como: fundaciones de neumáticos, muros y revestimiento de piedras del terreno, techos verdes, uso de maderas de demolición para estructuras secundarias y revestimientos, iluminación eficiente, huerta orgánica y jardines con vegetación nativa, todo regado con agua reciclada proveniente de una planta de tratamientos de aguas servidas.

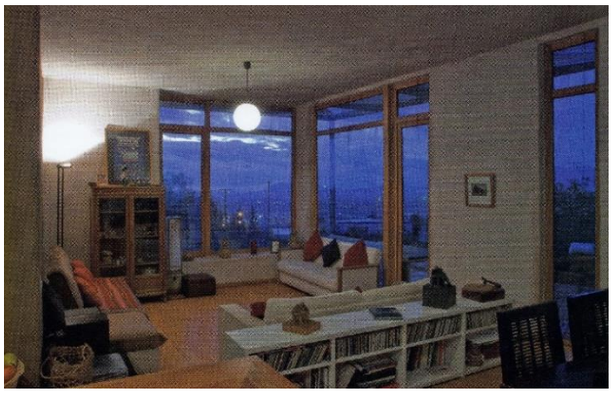


Fig. 3. 6

Fig. 3.7

Proyecto: Nicole Spencer Chuaqui

Asesoría en construcción con fardos de paja y ejecución: Jorge Broughton Wainer

Terminación: año 2014

Superficie construida: 230m^2

3.2. EN EL EXTRANJERO

3.2.1. Casa en Chapadmalal, cerca de Mar de Plata, Argentina

Esta construcción rustica se encuentra en la costa atlántica a 600 metros del mar. El aire marino y los constantes vientos fuertes, así como frecuentes tormentas, representan un desafío para el revestimiento exterior.

La casa de dos pisos tiene como esqueleto una estructura de rollizos de madera encastrados a mano. Los muros exteriores están rellenos con fardos de paja de cebada y de trigo. Los huecos se rellenaron con paja suelta mezclada con arcilla hidratada

Revoques:

- Revoque grueso de arena, arcilla y paja triturada; en partes exteriores se agregó emulsión bituminosa al agua.
- Revoque fino de arcilla limosa tamizada, arena tamizada, emulsión bituminosa, engrudo, ceniza y bosta de vaca fresca.

Luego de dos años de revoque fino sin pintura, la pared mostraba una cierta erosión debido al áspero clima marino, por lo que se decidió revestir toda la casa con tablas de madera Shou Sugi Ban (conservada mediante carbonización).

Después de habitar la casa, se encendió un fuego en una instalación eléctrica defectuosa, pero gracias a los fardos de paja, el incendio no pudo propagarse y no se causaron grandes daños.

Fueron los propios dueños los que diseñaron la casa y la ejecutaron, con la ayuda de familiares, voluntarios y algunos especialistas.

Proyecto: Gabriela Lagrange, Matías González, Lucas Etchevarne (especialista en estructura)

Terminación: 2015

Superficie útil: 112 m²

Fig. 3.8

3.2.2. Prototipo para la vivienda social en Sentinela do Sul, Brasil

La casa se construyó en el marco de un proyecto de investigación financiado por la Sociedad de Cooperación Técnica Alemana GTZ (hoy GIZ), que llevó a la construcción de tres prototipos de casas de materiales de construcción locales.

La planta cumple con los requisitos legales para viviendas sociales.

La planta se construyó en una región de cultivo de arroz, razón por la cual se construyeron los muros exteriores de fardos de paja de arroz. Los fardos están montados de canto y fijados por ambos lados con caña de bambú. El espesor del muro resulta en 35 cm. Los muros interiores están hechos de adobe. La estructura de madera se conforma por rollizos de eucalipto y como techo se encuentran sobre las vigas de rollizos se instalaron delgadas barras de bambú, una lámina de polietileno, una capa de nivelación de arena, una membrana de HDPE, un sustrato liviano de champas de una pradera cercana. En verano, el techo verde previene el calentamiento de la vivienda, protegiendo de la fuerte radiación solar.

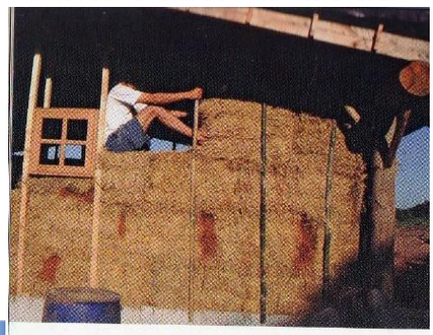
El diseño de puerta y ventanas permite la ventilación cruzada de todos los recintos.

El costo de construcción estuvo muy por debajo del costo de la vivienda convencional.

Proyecto: Gernot Minke, Marcio Rosa D'Avila

Terminación: año 2005

Superficie útil: 36 m²



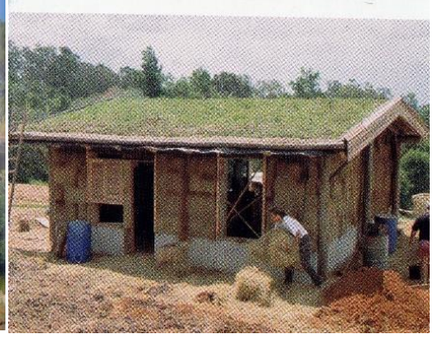


Fig. 3.9

3.2.3. Casa en Westerlinde, Alemania

Es una casa unifamiliar de bajo consumo energético, semi prefabricado.

Muros: Elementos estructurales prefabricados de madera. En obra, antes de levantar los muros, se instalaron los fardos de tal forma que quedan parados verticalmente en la pared.

Revestimiento: Los muros están revestidos por ambos lados con tableros de maderas procesada. Por el exterior están cubiertos con tinglado de madera. Por la cara interior se levantaron tabiques de adobe, generando un doble muro. Las divisiones interiores son del mismo material.

Aislamiento térmico debajo de la solera: Grava de vidrio celular.

Entrepisos: paneles contralaminados con aislamiento de sonido de impacto y losa flotante en seco.

Ático: Sin terminación. Entrepiso cubierto con aislamiento térmico de fardos de paja.

Proyecto: Stefan Kracht

Terminación: 2007

Superficie útil: aproximadamente 140 m²

Costo de construcción: 1250 €/m2

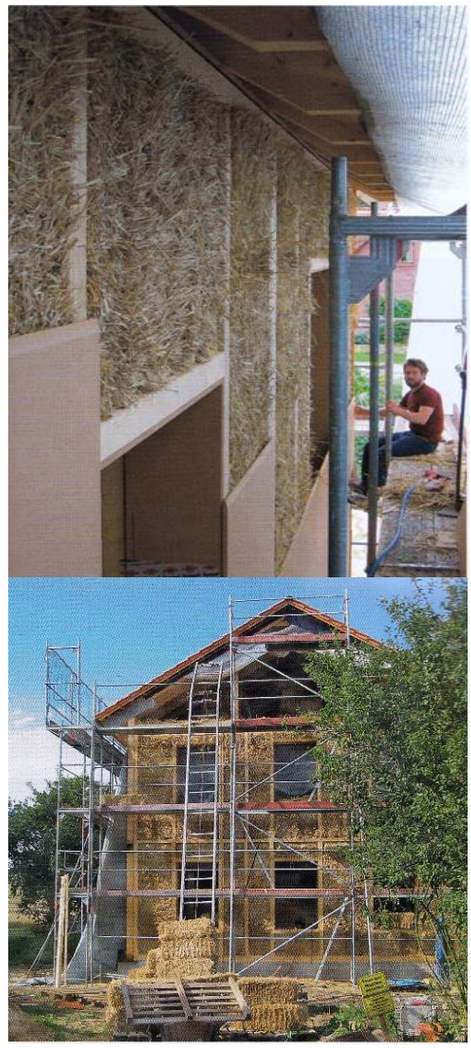


Fig. 3.10

Fig. 3.11

3.2.4. Casa en Langtaufers, Italia

Corresponde a una casa con dos viviendas de verano y una oficina de tres pisos más ático.

Muros portantes de fardos grandes acostados, de 120 cm de espesor.

Revestimiento exterior: revoque de cal.

Revestimiento interior: revoque de barro.

Techo piramidal con estructura de madera y fardos grandes, de 70 cm de espesor.

Demanda de energía térmica: 20 kWh/m^2*a.

Proyecto y dirección de la construcción con fardos de paja: Atelier Werner Schmidt

Terminación: año 2008

Superficie útil: 300 m^2

Fig. 3.12

Fig. 3.13

3.2.5. Estación Ecológica en Prenzlau, Alemania

Esta estación tiene dos salas multiuso independiente.

La primera sala tiene una planta en forma de huevo y un techo con claraboya piramidal.

La segunda sala es rectangular con un techo abovedado con claraboya en la cumbrera.

Los muros se conforman por entramados de tablones de madera con relleno de fardos de paja verticales. El revestimiento exterior es de revoque de cal, en el interior de barro.

El aislamiento térmico del techo está hecho de fibras de cáñamo a granel.

Realizado en el marco de un programa de capacitación por 20 hombres y mujeres desempleados.

Diseño, proyecto estructural y dirección de obra: STROH-unlimited, Friederike Fuchs, Britta Imhoff

Terminación: año 2008

Superficie útil: 78 m^2 y 80 m^2

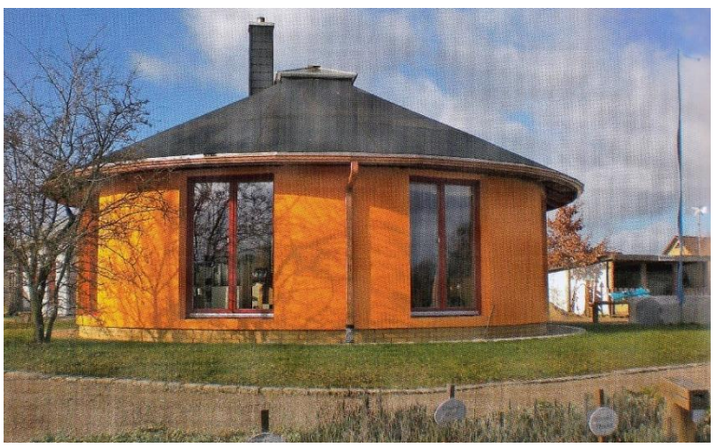


Figure 3.14

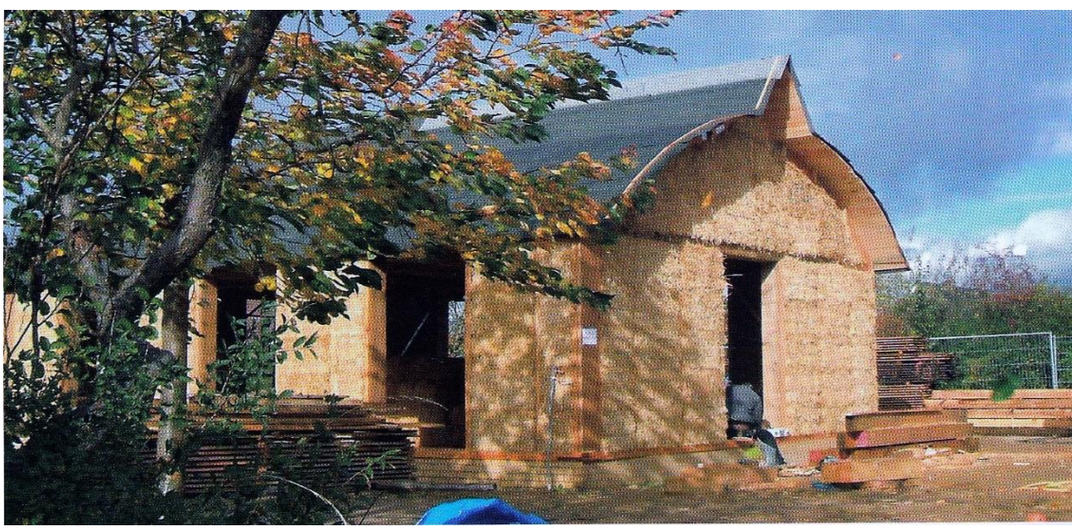


Fig. 3.15

3.2.4. Cúpula de música en Forstmehren, Alemania

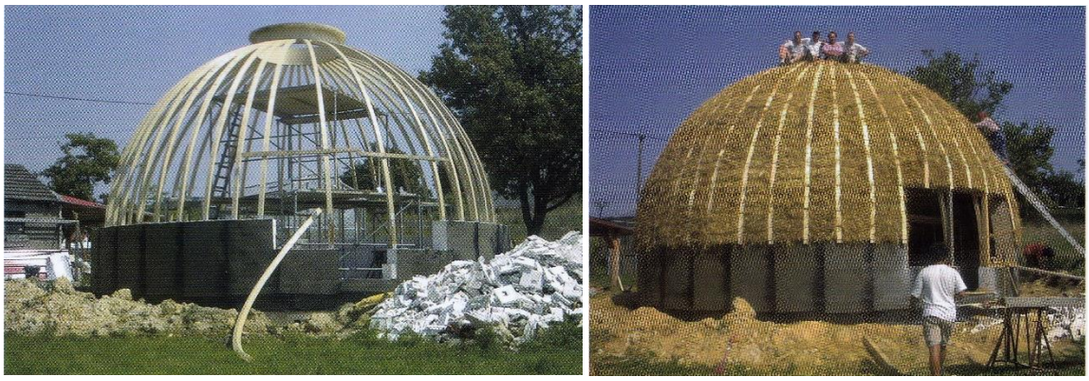


Fig. 2.16

Es una sala para actividades musicales del propietario Thomas Kagermann.

Fig. 3.17

La cúpula tiene una planta circular con un diámetro interior de 8,20 m y una altura libre de 5,10 m.

Se abre en el lado sur de una ventana de ancho de 2,70 que ofrece una vista sobre un paisaje campestre.

Una claraboya central de vidrio acrílico triple con un diámetro de 1,80 m ilumina el ambiente de manera uniforme.

Zócalo: Hormigón celular, altura 1,50 m. Por el exterior: relleno con tierra y cubierto con vegetación. Por el interior: construcción de piso (altura zócalo restante 1,00 m).

Sobre el zócalo se levanta la cúpula hemisférica de fardos de paja apilados sobre una estructura de arcos esbeltos. Los arcos de 8 x 8 cm se apoyan en el zócalo a una distancia al eje de 55 cm. Los fardos de paja se instalaron de canto, de tal forma que se genera una capa de aislamiento térmico de 35 cm.

Por el exterior de los fardos de paja, hay tiras delgadas de terciado con un espesor de 8 mm y un ancho de 8 cm, unidos con los arcos interiores mediante flejes. Por medio de la tensión de los flejes se comprimen los fardos un poco y se genera un efecto de acople que estabiliza la cúpula.

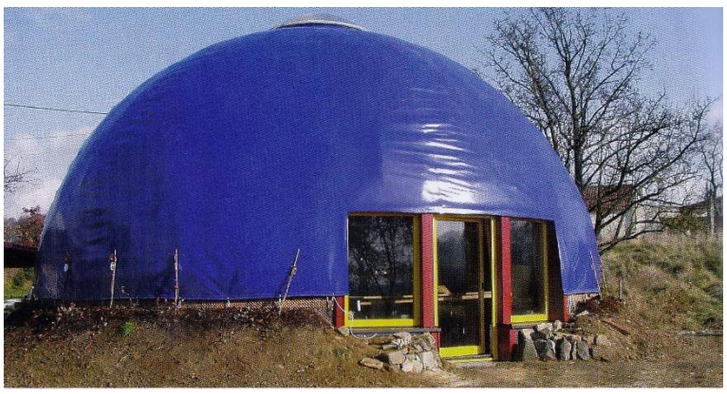
El proyecto de cálculo estructural indica que los fardos de paja instalados a presión cumplen con la estabilización horizontal de la cúpula. Debido a que las conexiones de los

perfiles de madera deben considerarse como articulados, se utilizan contravientos en cruz como rigidizadores adicionales.

Protección de fuego: En interior y exterior revoque proyectado de lechada de barro arcilloso que penetró la paja hasta 2 cm.

Terminación exterior: membrana de techo ultramarina.

Revestimiento interior: Revoque de barro de tres capas, entre los nervios con terminación cóncava, para mejorar la calidad acústica de la sala. La última capa recibió una dicion de 5% de aceite de linaza doble cocido para lograr un efecto retardante de vapor de agua. En el revoque se integraron luminarias diseñadas por Manfred Fahnert, que entregan una luz cálida especial.



Diseño: Gernot Minke

Proyecto y construcción con fardos de paja: Gernot Minke, Friedemann Mahlke

Terminación: año 2003

Superficie útil: 53 m^2

Fig. 3.18

CAPÍTULO 4: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL RECINTO DE YOGA PARA LA COMUNIDAD DE LA FINCA ECOLÓGICA PREMA MANDAL

4.1. PROPUESTA DE DISEÑO Y MÉTODO CONSTRUCTIVO UTILIZADO

El diseño arquitectónico del edificio para el yoga responde a las necesidades y condiciones socioculturales del sector, así como a las personas que habitan y visitan la finca ecológica, específicamente, a las que practican el yoga. Este recinto de yoga se adecúa al espacio, terreno y clima del sector, que además está rodeado de vegetación.

El método constructivo seleccionado para los muros de fardos de paja de este proyecto, es el "sistema portante" o "método Nebraska", el cual es elegido debido al tamaño y sencillez del edificio, ya que no requiere grandes cargas aparte del techo y porque consta de 1 planta, además por su facilidad de trabajo en comunidad. Otra cosa por la cual se elige este sistema de muros se debe a que no requiere de una estructura adicional, ya sea de madera u otro material de construcción, ahorrando así una gran cantidad de materiales, lo que se vuelve a cifras positivas si lo consideramos desde el ámbito ecológico y monetario.

Mientras más reciclamos, más ayudamos al medio ambiente y por lo tanto al ser humano, es por eso que en este proyecto consideramos, adicionalmente a los fardos de paja, el uso de neumáticos y pallets reciclados.

Para la práctica del yoga, una de las condiciones más importantes a considerar es el espacio que se necesita para realizar la actividad, que como mínimo se debe disponer de 2,5 m^2 de superficie por persona, y considerando que el área útil del edificio es de 24,11 m^2, éste podrá ser ocupado hasta por 9 personas al mismo tiempo, o 6 si se desea una mayor comodidad.

El diseño consta con la geometría de un polígono de 16 lados llamado hexadecágono, que se proyecta desde los cimientos hasta la viga de amarre. Son 16 paredes de fardos de paja con un largo de 1,2 m aprox., en las cuales se distribuyen la puerta y tres ventanas. Tal distribución de puerta y ventanas tiene el propósito de llenar de la luz natural el espacio, función que también cumple el tragaluz ubicado en la parte superior.

Es importante mencionar que debido al uso que se le dará al edificio, que es principalmente para prácticas de yoga, éste no llevara instalaciones domiciliarias, como agua potable o alcantarillado, ni tampoco muros interiores, lo que facilita y simplifica su autoconstrucción.

Fig. 4.1 Imágenes renderizadas de la propuesta arquitectónica dibujada en SketchUp

4.1.1. Emplazamiento y orientación

La Finca Ecológica Prema Mandal se encuentra ubicada al costado sur en el Km 44 de la ruta 146 que une las ciudades de Concepción y Cabrero, en la región del Bio-Bio.

Este hermoso lugar lo atraviesa un riachuelo de aproximadamente 3 m de ancho, en el extremo Noroeste del predio se encuentra una esquina irregular de 95 m^2 aproximadamente, sitio en el que irá emplazado el edificio en cuestión, el cual contará con 34.92 m^2 de construcción.

Fig. 4. Emplazamiento de la finca ecológica y el edificio para practicar yoga.

En la fig. x El polígono de color verde representa el emplazamiento de la Finca Ecológica Prema Mandal, mientras que el polígono de color azul representa la posición donde irá ubicado el edificio sustentable, construido con fardos de paja. La orientación del edificio corresponde con la parte frontal de este, en dirección al Noreste, donde habitualmente ingresen los rayos de sol, debido al ciclo solar en el hemisferio sur, donde por el lado Este amanece en el verano, llegando al Norte en invierno.

El ingreso al sector donde se sitúa este nuevo edificio, se facilita con un pequeño puente que fue construido por la comunidad. Fig. 4.4.

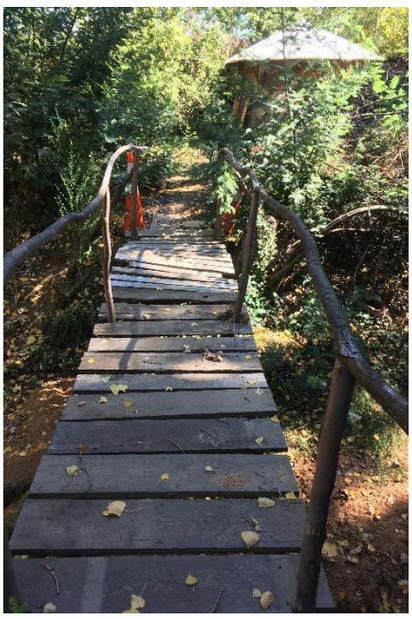


Fig. 4.4 Puente construido por personas de la Finca y que atraviesa el riachuelo de la misma.

4.2. CIMIENTOS Y PISO

Un muro de fardos de paja es por lo general, más ancho en comparación con muros convencionales, por tal razón, se requiere cimientos más anchos, y consecuentemente, más caros.

Una solución alternativa, practica, ecológica en cierta medida y poco convencional, es la que utilizaremos para las fundaciones, que es el uso de neumáticos usados rellenos de hormigón pobre. Esto para la autoconstrucción resulta una opción económica, ya que los neumáticos usados se pueden conseguir sin costo. Además, el relleno de los neumáticos requiere escombros y piedras grandes, por lo que se ocupará poco hormigón. En la figura 4.5 se observa un ejemplo de cimientos con neumáticos usados.

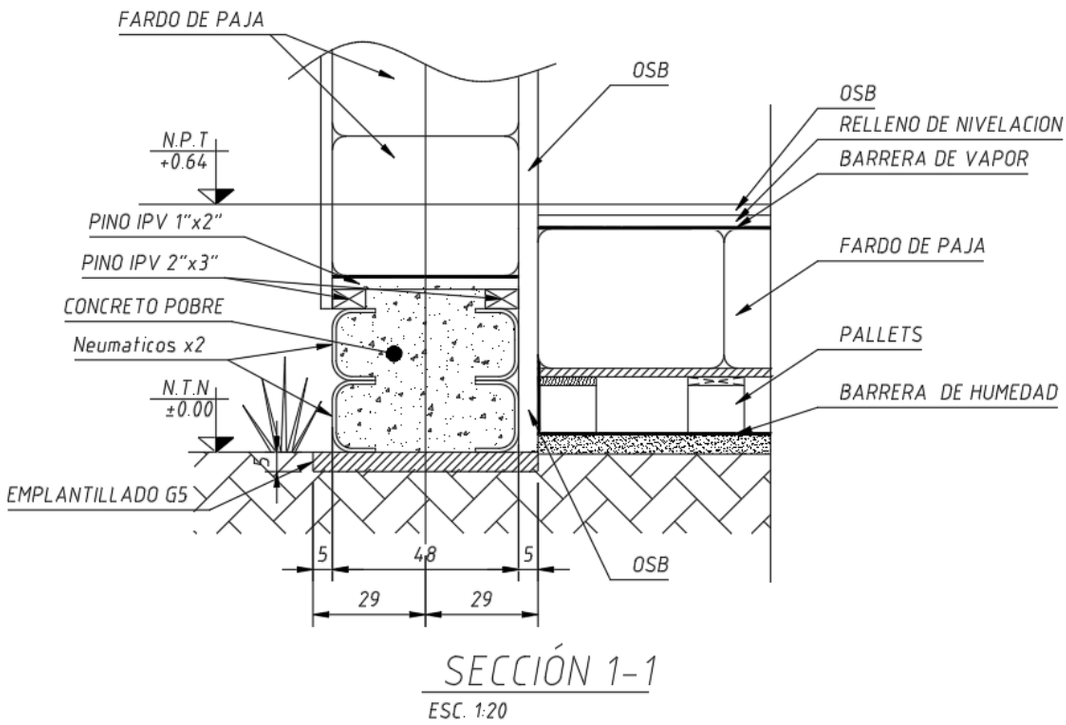


Fig. Diseño de cimientos y piso

Fig. 4.5 Construcción de cimientos con neumáticos usados de una construcción. Imagen tomada como referencia.

Para el piso, primero se coloca una capa de 10 cm de grava, 3 cm de arena, una barrera de humedad (polietileno) y encima van los pallets.

Sobre esto se ubican los fardos de paja bien comprimidos en todo el piso con el objetivo de tener un mejor aislamiento térmico del lugar, estos fardos se cubren primero con una barrera de vapor, un relleno de nivelación de arena de 3 cm y finalmente con placas OSB de 23 mm.

Si los fardos se colocan directamente sin una barrera de humedad, es posible que, en presencia de humedad por condensación, haya riesgo de moho o pudrición de la paja.

En la unión del muro con el cimiento y el piso, debe evitarse la generación de puentes térmicos. En la zona del cimiento debe preverse una protección contra salpicaduras que evite el humedecimiento del revoque de barro en contacto con la paja.

4.3. MUROS Y TECHUMBRE

Debido a que los fardos de paja se deforman en presencia de carga, entonces con muros portantes de fardos de paja se debe tener en cuenta lo siguiente:

- La carga del techo se debe distribuir lo más uniformemente posible sobre todos los muros, no deben producirse concentraciones de esfuerzo en ningún lugar.
- La carga del techo debe distribuirse sobre todo el ancho del muro.
- La altura del muro no deberá exceder 6 veces su espesor, a menos que el muro se proteja con elementos de arriostramiento horizontales para protegerlo de deformación.
- Los fardos deben tener una estructura intacta de tallo y una densidad de al menos 110 kg/m^3.
- Las aberturas de ventanas deberán ser estrechas y más bien altas y anchas.
- Dinteles de puertas y ventanas deberán evitarse, en lo posible. La viga de amarre deberá diseñarse de tal manera que asuma la función de dintel.
- Las distancias entre las aberturas de muros, así como la distancia entre una abertura y el muro más cercano, deben ser, de al menos, del largo de un fardo.
- En los muros especialmente largos y delgados, así como para altas cargas de techo, se deben preveer arriostramientos adicionales en los muros par aevitar deformaciones.
- La presión de las cargas de techo no debe exceder de 20 kN/m^2.

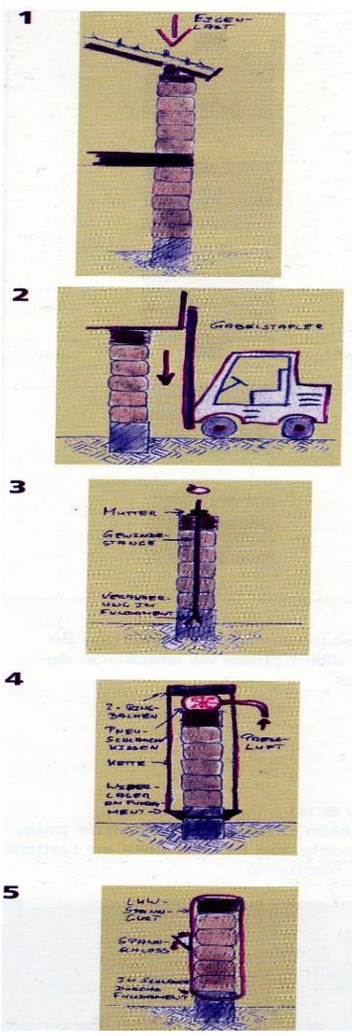


Fig. Sistemas alternativos de pretensado (según [Krick 2008])

1 peso propio
2 con grúa horquilla o cargador frontal
3 Por medio de varillas roscadas
4 Con gato neumático
5 Con zunchos de embalaje o eslingas de camión

- Los muros portantes deben pre-comprimirse suficientemente.
- En los muros no pre-comprimidos y para una carga de 40 kN/m^2, se debe contar con asentamientos hasta 10% (fardos pequeños de canto) o hasta 14% (fardos acostado). En fardos grandes de mayor compresión, el asentamiento resulta menor.

- Muros re-comprimidos también se pueden asentar cuando el pretensado no es suficiente o si soltara con el tiempo.

En edificaciones con muros portantes los fardos de gran formato son una ventaja, ya que ofrecen una mayor área para distribuir las cargas; por otro lado, son más comprimidos y, por lo tanto, presentan un menor asentamiento en presencia de cargas.

Sobre los cimientos van 8 fardos de paja pequeños, los cuales se apoya la viga de amarre de madera.

4.3.1. Ventanas y puerta

La ubicación y el diseño de las uniones de puertas y ventanas con los muros resultan decisivos a la hora de prevenir daños constructivos.

Para evitar puentes térmicos, se debe cubrir el marco de la ventana con aislamiento térmico tanto como sea posible.

Con una ubicación de la ventana alejada de la cara exterior del muro requiere una forma de alfeizar exterior que evacue las precipitaciones de forma segura, con bordes levantados.

En el revoque exterior, la junta del encuentro en el marco de la ventana resulta un punto crítico, ya que por ahí el agua puede penetrar con facilidad. Esto se evita con una banda impermeabilizante cubierta con un tapajuntas o bien con un sello elástico permanente.

4.2.1. Viga de amarre

El cierre superior del muro, se hace cargo de varias funciones: toma la carga del techo y la transfiere uniformemente a lo largo del muro, estabiliza la hilada superior de fardos contra deformaciones y, con ello, todo el muro. Refuerza el efecto rigidizador de las esquinas y puede servir como dintel de puertas y ventanas

La viga de amarre debe ser rígida y, preferentemente, del ancho del muro. Para distribuir las cargas se pueden colocar tableros de terciado u OSB debajo de las vigas.

También en el extremo superior del muro se debe asegurar que no se generen puentes térmicos.

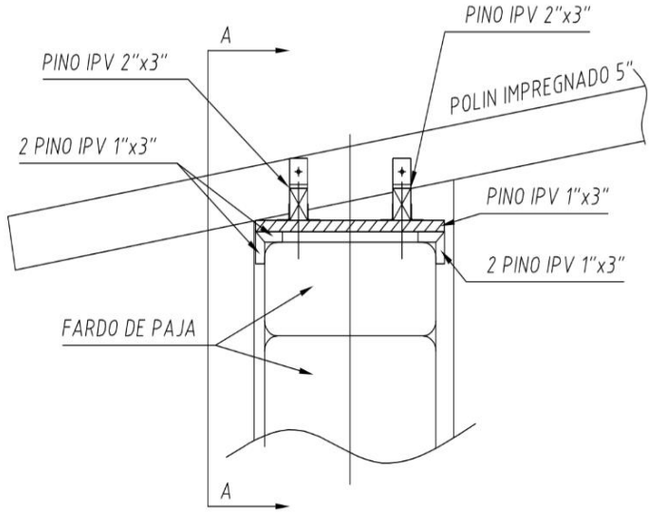


Fig. 4. Detalle de la viga de amarre diseñada para el edificio de práctica de yoga. Detalle de unión ente muro y techumbre.

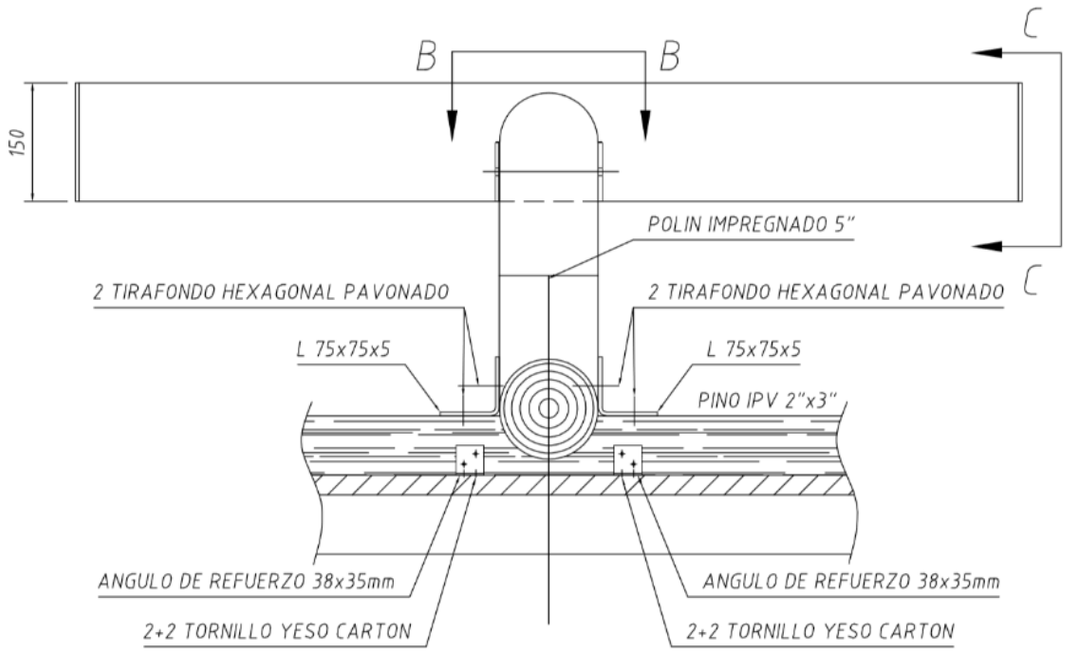


Fig. Corte A-A correspondiente a la figura 4.

En este caso, como la superficie exterior del muro es revocada, el alero es suficientemente grande con el objetivo de minimizar el efecto de precipitaciones directa sobre la fachada, ya que una fachada ventilada evita que la lluvia llegue a los fardos de paja.

Para evitar esfuerzos de torsión que pueden torcer la viga de amarre, en construcciones portantes, se debe tener en cuenta que la carga se canalice por el centro de la viga de amarre.

4.2.2. Techumbre

Para la estructura del techo se elige un sistema de 16 rollizos, los cuales descansan sobre el sobre la viga de amarre y llegan a una plancha circular de 1,20 m de diámetro, 5 mm de espesor y 150 mm de altura. Estos rollizos corresponden a Polín Impregnado de 5” de un largo de 3.40 m aprox.

En las figuras 4. se muestran el detalle de unión de la techumbre con el muro y además se muestran diferentes cortes del diseño.

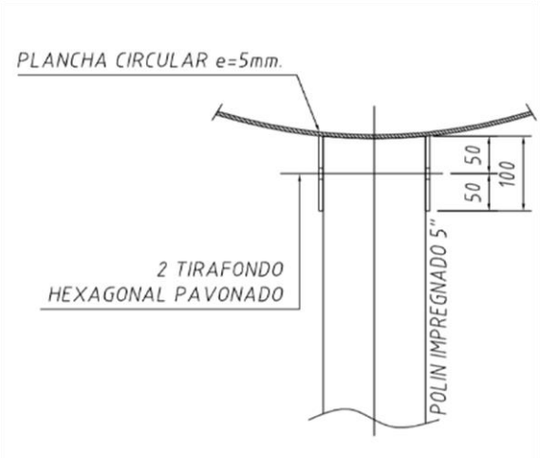


Figure 3 Corte B-B correspondiente a la fig.

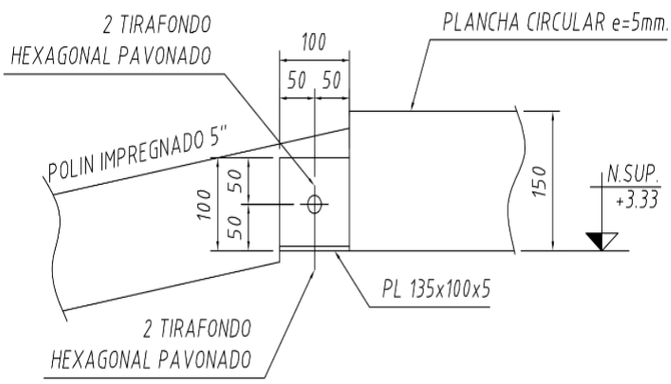


Fig. Corte C-C correspondiente a la fig.

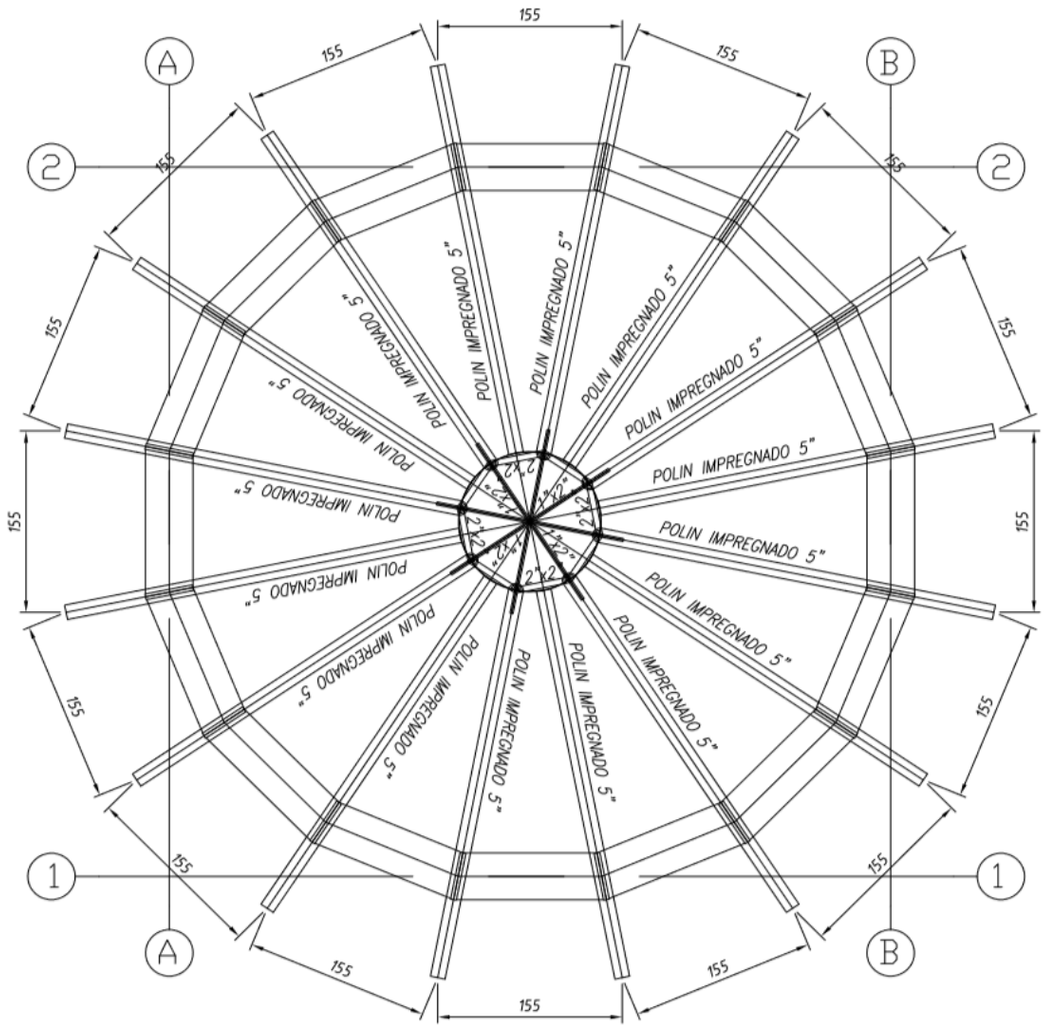


Fig. Diseño de la planta de techumbre

4.4. REVOQUES

Una posibilidad de terminar los muros de fardos de paja por el interior, es mediante un revoque. Este endurece y alisa la superficie de los fardos. Mediante el uso de mallas y uniones apropiadas, genera la hermeticidad al aire y la protección del fuego requerida.

Para prevenir las fisuras los revoques deben reforzarse en los encuentros de dos materiales diferentes y en los bordes, así como en superficies grandes, mediante la incorporación de una malla resistente a la tracción.

Barro, yeso, cal y cal-cemento son materiales adecuados para los revoques interiores. Revoques de cemento no son apropiados debido a su fragilidad y su baja elasticidad. Para las superficies interiores se recomiendan básicamente los revoques de barro porque contribuyen más que cualquier otro material a mantener el equilibrio de humedad del aire interior. Como revoques exteriores, los revoques de barro solo son apropiados para las superficies protegidas de la lluvia. En caso de una carga mínima de lluvia, eventualmente se pueden usar revoques de barro estabilizados. Pero en general corresponde aplicar revoque de cal. (Minke & Krick, 2017)

4.4.1 Revoque interior

Para revoque interior de los muros de este proyecto, seleccionamos un revoque de barro, ya que éste posee ventajas significativas con respecto a otros revoques, gracias a su efecto regulador de la humedad del aire y a su elasticidad.

Experimentos realizados en el Laboratorio de Investigación para la Construcción Experimental de la Universidad de Kassel (FEB), Alemania, mostraron que un revoque de barro, con altos niveles de humedad del aire, absorbe más humedad que otros revoques. Con aire seco, el revoque libera la humedad almacenada y, de esta forma, contribuye a crear un clima interior saludable y equilibrado.

El revoque se instalará en tres capas. La primera, se emplea principalmente para adherir los extremos salientes de los tallos. Deberá aplicarse en consistencia muy líquida, bajo mucha presión, para que penetre profundamente en los fardos. La forma más simple es con la aplicación de una bomba, luego se imprimen los tallos embarrados con una tabla o una llana ancha en la capa de revoque. Para una buena adherencia a la paja este tiene un alto contenido de arcilla. Las grietas de contracción que se generan al secarse no causan daño, al contrario, incrementan la adherencia de la siguiente capa de revoque.

La segunda capa de revoque debe quedar menos arcillosa, aumentando el contenido de arena y/o grava fina para reducir la formación de grietas durante el secado. También se puede agregar aserrín, paja picada fina o molida, que actúan a la vez como refuerzo. La tarea principal de esta segunda capa es la de nivelar irregularidades de la superficie del muro. Se aconseja rellenar los huecos y áreas disparejas, con una mezcla de paja triturada con un poco de barro antes de aplicar la segunda capa de revoque.

La tercera capa de revoque es la que termina el muro. se aplica en una capa de 5 a 10 mm de espesor de revoque fino. Por razones estéticas o para evitar el agrietamiento durante el secado, se puede añadir arena gruesa, paja molida, fibras o partículas similares. El contenido de arcilla, por lo general, es solo entre el 5 y 8%. Es importante que la segunda capa de revoque esté suficientemente humedecida y rugosa. El revoque debe ser echado y alisado energéticamente para conseguir una buena adhesión.

Luego del secado inicial, la superficie de la tercera capa de revoque puede alisarse con una llana con esponja o fieltro humedecido. El espesor total de las capas de revoque es de 3 a 6 cm. Cuanto más grueso sea el revoque, mayor será el efecto de almacenamiento de calor del muro y su efecto equilibrante de humedad del aire.

4.4.2. Revoque exterior

En los muros de fardos de paja se consideran problemáticos los revoques exteriores expuestos a la lluvia directa, porque la paja detrás del revoque puede llegar a un nivel cítrico de humedad, debido a la lluvia y a la humedad capilar. Es por eso que normalmente es preferible un revoque de cal. Aunque también es una posibilidad muy efectiva que es utilizar un revestimiento ventilado, como por ejemplo los tinglados horizontales y entablados verticales de madera, sin embargo, en esta solución los muros también deberían ser impregnados con un revoque proyectado preferentemente de barro, como protección contra incendios, para evitar la entrada de insectos y pequeños animales y para disminuir la accesibilidad del viento.

Para el proyecto en cuestión, utilizaremos un revoque de cal; el revoque de cal, eventualmente con una pequeña adición de cemento, ha resultados ser confiable como revoque exterior de un muro de fardos de paja.

Es importante saber que el revoque de cal reacciona con el CO_2 del aire a $CaCo_3$ (carbonato de calcio) y que este proceso solamente ocurre es estado húmedo y muy lento. Por lo tanto, el revoque no debe secar completamente después de la aplicación: debe protegerse contra el sol y, eventualmente, hay que humedecerlo. En las primeras semanas, además, debe estar protegido de la lluvia directa y de las heladas porque fácilmente puede

erosionar o congelarse. El proceso de fraguado está prácticamente completo al cabo de tres meses. Sin embargo, durante los primeros tres años la dureza sigue aumentando.

Para acelerar el proceso de curado, es conveniente añadir aproximadamente 5% de cemento, que fragua dentro de pocas horas hidráulicamente (por absorción de agua). También es adecuado la cal Trass con curado hidráulico en su mayor parte.

Como es la primera capa, se recomienda un revoque fino proyectado, que se aplica a alta presión, de modo que los extremos salientes de las pajitas se encolen. Luego, como soporte de revoque, se puede instalar una estera de caña o una malla metálica. Esta recibe dos capas de revoque. También se puede trabajar sin soporte de revoque, pero, en este caso, debería integrarse en la segunda capa de revoque una malla de refuerzo resistente a la tracción. La última capa de revoque debe estar libre de fisuras. Las microfisuras de menos de 0.2 mm de espesor pueden cerrarse con un recubrimiento. En cualquier caso, es importante que el revoque en el área del zócalo esté protegido contra salpicaduras, lo que se puede hacer con aditivos o revestimientos hidrófugos o la instalación de un revestimiento a prueba de agua.

El revoque de cal se compone de 1 parte en volumen de cal y de 3 a 4 partes de arena, perfectamente se puede utilizar la cal apagada comercial, finamente molida (hidróxido de calcio). Es recomendable reposar la cal apagada, finamente molida por varios días antes de utilizarlo como revoque.

Durante la manipulación de la cal, es recomendable utilizar guantes y gafas de protección, debido a que es fuertemente alcalina.

Por lo general es mejor estucar los muros de fardos de paja primero por el interior, para que la humedad pueda difundirse de forma relativamente libre a través del muro hacia el exterior. Si el revoque interior es aplicado después del revoque exterior, hay un riesgo de que condense demasiada humedad en l aparte exterior de los fardos, lo que puede conducir a la generación de moho.

CONCLUSIÓN

Cereales como el trigo, la avena y el maíz son unos de los principales productos agrícolas del país, la paja es el residuo que se genera en el proceso de cosecha de estos cereales. Con la producción de los fardos de paja, aparte de preservar alimentos para los animales, es posible utilizarlos en el rubro de la construcción y eso es muy bueno y se considera un aporte al medio ambiente, ya que estamos ocupando desechos agrícolas de una manera muy inteligente.

A través de este trabajo investigativo damos cuenta de que la construcción de edificios con muros hechos con fardos de paja no solo es beneficioso para ayudar al medio ambiente, sino, además, para ayudarnos a nosotros mismos construyendo con un material que demuestra sus propiedades físicas como un gran aislamiento térmico y acústico, lo que lo hace muy eficiente energéticamente, sobrepasando a materiales usados habitualmente como la madera o albañilería, por ejemplo. Todo esto siempre y cuando la construcción quede bien hecha, ya que el riesgo del desarrollo del moho u otras afecciones es inminente cuando queda mal construido el edificio, como con toda obra de construcción.

Acerca del costo de construcción con fardos de paja, en general, éste varía, dependiendo siempre el método constructivo a utilizar y la envergadura y funcionalidad del edificio. En el caso de nuestro proyecto, el tema económico se vuelve una ventaja, principalmente debido a que permite procesos de autoconstrucción. También en el tamaño y la simplicidad del diseño, que cuenta solo con un piso y un espacio (sin muros interiores) y sin instalaciones domiciliarias como agua potable o alcantarillado.

En Chile construir edificios utilizando los fardos de paja como principal material de construcción es poco común, pero cada vez va haciéndose más conocido el método, muchas veces porque se desconoce su uso y sus propiedades físicas como material y además porque muchas personas no se atreven o no encuentran asesoría.

Ser parte de un proyecto para una comunidad o un movimiento ecologista, como es la Finca Ecológica Prema Mandal, nos hace reflexionar, acerca del daño que el hombre puede causar al planeta y de alguna manera sentirnos responsables de hacer un cambio. Con este trabajo de título esperamos ser un aporte para que la construcción sustentable se siga desarrollando en nuestro país, el cual esperamos tenga un avance hacia normativas específicas de construcción con fardos de paja y al desarrollo de tecnologías más avanzadas y menos dañinas para la naturaleza.

BIBLIOGRAFÍA

Minke, G., & Krick, B. (2017). *Manual de construcción con fardos de paja.* Cable a tierra.

CITEC UBB. (2014). *Ensayos de fardos de paja.* Concepción.

IDIEM. (2014). *Ensayo de resistencia al fuego de muros con fardos de paja.* Santiago.

Finca Ecologica Prema Mandal/Facebook (04 de noviembre de 2018). Obtenido de https://www.facebook.com/photo.php?fbid=348474322623999&set=a.100540977417336&type=3&theater