



XII ENCAC Encuentro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
VIII ELACAC Encuentro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído

BRASÍLIA | 25 a 27 de setembro de 2013

FARDOS DE PAJA: ¿UNA SOLUCIÓN PARA VIVIENDAS RURALES ENERGÉTICAMENTE EFICIENTES EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE?

Christopher J. Whitman (1)

(1) B.Arch(Hons), Dip.Arch RIBAIII, Coordinador del Laboratorio de Energía e Iluminación,
c.whitman@uandresbello.edu

Campus Creativo, Universidad Andres Bello. Campus Casona Las Condes, Fernández Concha 700, Las Condes, Santiago de Chile, Tel.: +56 2 2661 8684

RESUMEN

Chile es un país con una alta dependencia energética. En 2011, de los combustibles fósiles usados por Chile, un 92% eran importados, lo que representaba un 68% de la energía primaria. Al mismo tiempo un 60% de la población pasan invierno con temperaturas promedias bajo 15°C y un 80% experimentan problemas de condensación y hongos. Un estudio en 2006 mostró que los tres quintiles más bajo de la población sufren de pobreza energética. En adición el alto uso de leña, muchas veces de mala calidad, quemado en estufas y cocinas ineficientes, produce contaminación atmosférica, con casi todas de las ciudades del valle central y sus alrededores declaradas saturadas por partículas PM10. Este artículo presenta el trabajo del Laboratorio de Energía e Iluminación de la Universidad Andrés Bello donde se ha mostrado, con mediciones en celdas de prueba físicas, que la construcción con los fardos de paja puede proporcionar mejores niveles de confort higrotérmico interno que una vivienda que cumple con la Reglamentación Térmica Chilena y mejorar la eficiencia energética de las viviendas, con un ahorro de alrededor de un 29% en calefacción. Al mismo tiempo la construcción con los fardos de paja reutiliza un desecho agrícola y tiene una plástica parecida a la de la arquitectura patrimonial de la zona central.

Palabras claves: Fardos de paja, viviendas rurales, confort higrotérmico, eficiencia energética

ABSTRACT

Chile is a country with a high energy dependency. In 2011 92% of the fossil fuels consumed were imported. These represent 68% of Chile's primary supply. At the same time 60% of the population experience average indoor temperatures of less than 15°C and 80% of the housing stock have problems of high condensation and resultant mold growth. A study of household budgets in 2006 showed that three fifths of the population suffer from fuel poverty. In addition the high usage of firewood, often of poor quality, burnt in inefficient stoves and fires, produces atmospheric pollution with most of the cities of the central valley and their surrounding countryside declared saturated by particulate matter MP10. This paper presents the work of the Laboratory of Energy and Lighting of the Universidad Andrés Bello which has shown, with measurements in physical test chambers, that straw bale construction can provide high levels of internal hygrothermal comfort than those of a dwelling that meets current Chilean thermal building regulations. At the same time this type of construction can improve the energy efficiency of the dwelling with an approximate energy saving of 29%. Additionally straw bale construction reuses agricultural waste and has an aesthetic similar to the historical adobe architecture of Chiles Central Valley.

Keywords: Straw Bales, rural housing, higrothermal comfort, energy efficiency.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Los problemas

1.1.1. La Crisis Energética chilena

Chile es un país con una alta dependencia energética. En el año 2011, de los combustibles fósiles usados por Chile, un 92% era importado, lo que representa un 68% de la energía primaria (Ministerio de Energía 2012). Además, por la tercera vez en 5 años, la zona central de Chile dónde se concentran las centrales hidroeléctricas que producen 43,2% de la electricidad nacional (Ministerio de Energía 2012),

está sufriendo una sequía (Dirección Meteorológico de Chile 2013).

Aunque Chile cuenta con recursos de energía renovable y limpia muy abundantes, el desarrollo de las tecnologías para aprovechar estos recursos tardará mucho tiempo en llegar y ser implementado. En el corto y medio plazo Chile va a seguir dependiendo de la importación de energía (CCTP 2011). El concepto de eficiencia energética está solamente empezando en Chile donde el crecimiento económico va mano en mano con el crecimiento de consumo de energía, no como los otros países del OCDE donde desde los años 70 había un desacoplamiento de estos dos factores con medidas de eficiencia energética bajando la demanda energética mientras el PIB seguía creciendo.

1.1.2. Déficit habitacional rural cuantitativo

Según el censo del año 2012, un 6% de la población rural viven en mediaguas, mejoras, chozas o viviendas precarias de materiales reutilizados. De ellos 57% viven en la zona central entre las Regiones de Valparaíso y La Araucanía, representado un total de 23.922 hogares en esas Regiones (INE 2013). En su mensaje presidencial del 21 mayo 2012, el presidente de la República hablaba de la necesidad de hacer llegar “la sociedad de oportunidades” a los 2,5 millones de que viven en el campo. Además él hablaba de la reconstrucción post terremoto y de la eficiencia energética (Piñera 2012).

1.1.3. Déficit habitacional cualitativo

Aunque históricamente la construcción rural del Valle Central de Chile era la construcción indígena de las rukas y la arquitectura colonial del adobe, actualmente se construye principalmente en madera. En muchos casos las viviendas de madera construidas antes de la introducción de la Reglamentación Térmica en 2007 no tienen aislación, lo que resulta que sus muros tienen una transmitancia térmica de aproximadamente $3,5\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ y muchas infiltraciones de aire y humedad. Las construidas después de 2007 deben cumplir con la reglamentación con muros con un valor-U máximo de $1,9\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ en el norte de zona y $1,7\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ en el sur del Valle Central. Aunque Chile fue el primer país Latinoamericano en introducir una reglamentación térmica para la construcción de viviendas, la exigencia de la reglamentación ha sido criticada por académicos nacionales (BUSTAMANTE et al. 2009) y por el OCDE en su último informe nacional (CALDERA SÁNCHEZ 2012). Dado que la temperatura promedio de invierno es 10°C y la temperatura mínima en promedio es $3,9^\circ\text{C}$, esta carencia de suficiente aislamiento resulta en altas demandas de calefacción y bajos niveles de confort higrotérmico. Por si fuera poco, las construcciones en madera falta la masa térmica necesaria para las temperaturas altas de verano, que resulta en el sobrecalentamiento de ellas. Según un estudio (INSTITUTO DE LA CONSTRUCCIÓN 2008) que se realizó en 4 ciudades del país y que consideró viviendas de hasta 4000 UF, un alto porcentaje de viviendas chilenas tienen bajo condiciones higrotérmicas, con más de 80% con problemas de condensación y hongos. Estas condiciones representan un grave problema con respecto a la salud de sus ocupantes, un problema que el gobierno Chileno quiere solucionar.

1.1.4. Pobreza Energética

En muchos casos la alta demanda de calefacción escapa a los recursos económicos de los hogares. Esta situación se define bajo el concepto de 'pobreza energética' o 'fuel poverty' que fue definido por Lewis (1982) y revisado por Healy (2004) como "la inhabilidad de permitir calentar adecuadamente el hogar a causa de bajos ingresos y viviendas de baja eficiencia energética" (HEALY 2004) y es aplicable a los hogares donde tendrían que gastar más del 10% de sus ingresos mensuales para tener niveles de confort térmico satisfactorios. Según estudios realizados por Márquez y Miranda (2007), los gastos energéticos de los tres quintiles más pobres en Chile en 2006 subieron un 10% cuando la leña es incluida en los cálculos (MÁRQUEZ; MIRANDA 2007).

1.1.5. Contaminación aérea

Con el intenso uso de leña y la utilización de estufas o calefactores ineficientes, la alta demanda de calefacción de las viviendas resulta en contaminación aérea intra y extradomiciliario (CONTRERAS 2008). De las 12 zonas declaradas saturadas por contaminación aérea MP10, siete de ellas son en parte el resultado de las viviendas. En el valle central de la VI Región la contaminación por leña representa un 28%, una cifra que sube en el caso de Concepción a un 32% y un 93% en Temuco (SINIA 2011). Esta situación está repetida a una escala menor en cada pueblo y aldea rural donde entre un 93% y 100% de las viviendas usan leña como su combustible principal (GÓMEZ-LOBO et al. 2005). En adición a la contaminación por las viviendas, las quemas agrícolas representan una fuente de contaminación aérea en las zonas rurales. En la VI Región, dado su estatus de una zona saturada por contaminación aérea MP10 y su impacto en la Región

Metropolitana también declara saturada, las quemadas agrícolas son prohibidas durante los meses de invierno. Sin embargo en 2009 había 360 acciones judiciales por violación de esta ley, por falta de métodos alternos por el tratamiento de los desechos en muchos casos del rastrojo de cereales.

1.2 ¿La construcción en fardos de paja podría ofrecer una solución?

1.2.1 Un desecho agrícola

La paja es un desecho agrícola que muchas veces se quema aumentando la contaminación de la atmósfera y emisiones de dióxido de carbono. Estudios internacionales han mostrado que la construcción con fardos de paja y madera es uno de los únicos sistemas constructivos que no emite gases de efecto invernadero, sino que los captura y almacena (ALCORN; DONN 2010). Las estadísticas oficiales (ODEPA) muestran que en el año productivo 2011-2012 385.414 hectáreas fueron sembradas con cultivos que producen paja. Casi todas de estas hectáreas se encuentran en la zona central de Chile y todas producen paja apta para construcción. Dado que en promedio una hectárea produce entre 2,69 y 3,5 toneladas de paja (LEE; GROVE 2005), de lo que un 60% termina en la forma de fardos, y que en promedio un fardo pesa 20kg, este significa que después de la cosecha de 2012 había 35.785.690 fardos o 6,25 fardos por hogar chileno. Mientras algunos de estos fardos tienen un uso agrícola para cama de ganado, la mayoría estarían disponibles para la construcción.

1.2.2. La historia de la construcción con los fardos de paja

Aunque los rastrojos de cereales, la paja, han sido materiales utilizados en construcción por mucho tiempo; mezclado con barro para formar adobe, quincha, tapial, leichtlehmbau, cob y clay lump; o colocado en el techo en forma de cubierta; fue solamente a fines del siglo XIX cuando comenzó la construcción con fardos de paja en la región de Sand Hills, Nebraska (LACCINSKI; BERGERON 2000). En ese lugar la construcción tradicional era “sod construction,” es decir, un técnico en que se elaboraban bloques cortados directamente de la tierra y se construían con ellos. Como sugiere su nombre, la tierra en Sand Hills (Lomas de Arena) fue muy arenosa y no fue posible cortar bloques de ella. Buscando otro material constructivo los habitantes de Sand Hills encontraron los fardos de paja de las nuevas enfardadoras mecánicas y empezaron de construir con ellos. El primer edificio registrado, construido de fardos de alfalfa sin recubrimientos fue en Bayard Nebraska en el año 1896 y fue comido por vacas entre 1896 y 1902 (BOZEMAN 2010). Los edificios construidos después de este ejemplo fueron siempre construidos con paja, que los animales no comen y terminado con un estuco de barro. Existen ejemplos construidos en los años 1920 que todavía están habitados.

En 1973, con la primera crisis energética mundial, la construcción con los fardos de paja tenía un renacimiento que empezó en los EEUU, extendiéndose a Europa y ahora es posible encontrar ejemplos de construcción en fardos de paja en todos los continentes salvo Antártica (MAGWOOD 2004).

1.2.3 Sistemas constructivos

1.2.3.1. Estilo Nebraska

El sistema constructivo más antiguo se llama “Nebraska Style.” Los fardos están sobrepuesto uno arriba del otro en forma de albañilería simple, sin refuerzo. Los fardos están sujetos a compresión vertical por mallas exteriores o fierros con rosca pasado por el centro. Los fardos forman la estructura y toman todas las cargas estructurales. Existen ensayos que muestran que el estilo Nebraska con estuco de barro puede resistir un movimiento sísmico de 200% de Mw6.7 o 0,82g (CHAMPION 2009).

1.2.3.2. Poste y viga

El sistema constructivo conocido como poste y viga tiene una estructura de madera con los fardos puesto como relleno entre ella. Los fardos no toman ninguna carga estructural. Este sistema tiene la gran ventaja que el diseño de la estructura de madera es lo mismo que el diseño de cualquiera vivienda de madera, un proceso conocido por casi todo los calculistas de estructura nacionales. Por eso el diseño estructural y resistencia a los sismos no presenta problemas adicionales. La mayor desventaja es la cuestión de ¿dónde ubicar la estructura? Existen distintas opciones; con la estructura de afuera; la estructura de adentro; adentro y afuera; o en línea con los fardos. Las primeras opciones tienen la desventaja en que se ensancha el espesor del muro, mientras que el último involucra más trabajo en cortar los fardos para encajarlos con la estructura. La

construcción poste - viga requiere el trabajo de un carpintero y la estructura está hecha a medida en el sitio.

1.2.3.3. Prefabricación con los fardos de paja Modcell®

La Universidad de Bath, Reino Unido, ha desarrollado el sistema constructivo Modcell®, un sistema prefabricado que consiste de paneles de fardos de paja confinados en una estructura solida de “cross laminated timber” CLT. Los paneles de 3m de alto x 3,2m de largo y 0,48m de ancho son terminados en la fábrica con un estuco de cal. Los paneles pesan hasta 1,7 toneladas y tienen una transmitancia térmica de 0.13-1.19W/m²K (MODCELL 2012).

Esta fabricación tiene las ventajas de un sistema constructivo industrializado con mejor precisión, control de calidad, estandarización, certificación del producto y menos tiempo en obra. Hasta ahora han construido con el sistema 18 edificios grandes. Sin embargo el formato final es muy grande y pesado y se requiere el traslado y maniobra por maquinaria tales como cargadores frontales y grúas. Mientras que en la construcción de edificios grandes el uso de estas maquinarias no presenta ningún problema, para la construcción de viviendas individuales y en la autoconstrucción los módulos son demasiado grandes. Un sistema diseñado para la construcción de viviendas rurales debería ser posible utilizar sin el uso de maquinaria.

1.2.4. Las Propiedades físicas de los fardos de paja: Ensayos de Laboratorio

1.2.4.1. Conductividad Térmica

En la tabla 1 se presentan los resultados de ensayos internacionales y dos ensayos nacionales de la transmitancia térmica de los fardos de paja.

Tabla 1- Resultados de ensayos internacionales y nacionales de transmitancia térmica de los fardos de paja.

| Autor | Fecha | Lugar | Método | Tipo de paja | Tamaño [mm] | HR [%] | Densidad [kg/m ³] | Valor U [W/m ² K] | λ [W/mK] AP- a pie Ac- Acostado |
|-------------------------------|-------|---|--------------------------------|---------------------|--------------------|---------|-------------------------------|------------------------------|---|
| Mccabe J. | 1993 | University Arizona | Placa de guarda. Un fardo | Trigo | 580 | 8.4 | 133 | 0,103 | 0,054 AP 0,061 Ac. |
| Acton R.U. | 1994 | Sandia Labs | Thermal Probe Un fardo | No esp. | 460 | No esp. | 83.3 | 0,118 | 0,05 Ac |
| Watts et al. | 1995 | Nova Scotia | Placa de guarda, in-situ | No esp. | 460 | No esp. | No esp. | 0,2 | 0,097 |
| No Esp. | 1996 | Oak Ridge National Lab | Cámara térmica. Muro entero | Trigo | 460 | 20 | 112 | 0,334 | 0,15 |
| No Esp. | 1997 | CEC | Cámara térmica. Muro entero | Arroz | 580 | 11 | 107 | 0,218 | 0,13 |
| Stone N. | 1997 | Architectural Testing Labs-Fresno | Cámara térmica. | No esp. | 580 | No esp. | No esp. | 0,218 0,172 | 0,13- 0,07 |
| No Esp. | 1998 | Oak Ridge National Lab | Cámara térmica. Muro entero | No esp. | 480 | 13 | 128 | 0,208 | 0,099 |
| Wimmer R. | 2001 | BMVIT, Vienna | ISO 8301 | No esp. | No esp. | No esp. | No esp. | No esp. | 0,038 |
| Wimmer R. | 2001 | BMVIT, Vienna | ÖNORM B6015 | No esp. | No esp. | No esp. | No esp. | No esp. | 0,034 |
| Andersen J.M. Y Andersen B.M. | 2004 | Statens Byggeforskning sinstitut, Denmark | Cámara térmica. Un fardo | No esp. | 385 365 | No esp. | 75 90 | 0,208- 0,196 | 0,052- 0,056 AP 0,057-0,060 Ac |
| Goodhew S. Griffiths, R. | 2004 | University of Plymouth | Sonda térmica | No esp. | 360 | No esp. | 60 | 0,18 | 0,067 |
| No Esp. | 2006 | Deutsches Institut für Bautechnik | No esp. | No esp. | No esp. | No esp. | No esp. | No esp. | 0,052 AP 0,08 Ac. |
| Idiem (Rodriguez 2007) | 2003 | Santiago de Chile | NCh 850 anillo de guarda | Trigo cortada 3,5cm | 400x 400x 35 | No esp. | No. esp | No esp. | 0,28 |
| Idiem | 2009 | Santiago de Chile | NCh 851 cámara térmica | Trigo | 0,3m 0,4m | No esp. | No. esp | 0,2-0,3 0,15-0,2 | 0,06-0,09 |

Los resultados muestran un rango de valores para el coeficiente de conductividad (λ) entre 0,034W/mK y

0,28W/mK. Una explicación por este gran rango de resultados podría ser el tipo de paja y la densidad de los fardos, sin embargo podría ser la metodología utilizada también. En el caso de uno de los ensayos nacionales, este se realizó con un anillo de guarda y se utilizó probetas a escala hechas a mano con paja de trigo que se cortaron de 3 a 3,5cm de largo y se comprimieron manualmente (RODRIGUEZ VIVANCO 2007). Entonces con esta compresión manual fue imposible obtener la densidad de un fardo hecho por maquina. Sin embargo si calculáramos la conductividad de un muro de 36cm de paja con 3cm de estuco de barro por ambos lados usando el peor coeficiente de conductividad 0,28W/mK (el valor del ensayo nacional), obtendríamos un valor U de 0,72W/m²K, suficiente para cumplir con la Reglamentación Térmica Chilena en todo las zonas térmicas, salvo la más extrema (tabla 2.) (MINVU 2011).

Tabla 2- Tabla de transmitancia (valor U) máxima de viviendas chilenas según decreto N°192 10

| Zona térmica | Techumbre U W/m ² K | Muros U W/m ² K |
|--------------|--------------------------------|----------------------------|
| 1 | 0,84 | 4,0 |
| 2 | 0,60 | 3,0 |
| 3 | 0,47 | 1,9 |
| 4 | 0,38 | 1,7 |
| 5 | 0,33 | 1,6 |
| 6 | 0,28 | 1,1 |
| 7 | 0,25 | 0,6 |

1.2.4.2. Resistencia al fuego

Aunque sabemos que es posible quemar paja suelta sin problema, los fardos de paja no se queman fácilmente por su compresión y falta de oxígeno. Cuando los fardos están terminados por ambos lados con un estuco, esta resistencia al fuego aumenta. En la tabla 3, se presentan los resultados de ensayos internacionales (THEIS; KING 2006) y un ensayo nacional (RODRIGUEZ VIVANCO 2007) de la resistencia al fuego de los fardos de paja. Estos resultados muestran que los fardos con un estuco de barro tienen una resistencia de 60 minutos y con un estuco de cemento tienen una resistencia de 2 horas.

Tabla 3- Resultados de ensayos internacionales (THEIS; KING 2006) y nacionales (RODRIGUEZ VIVANCO 2007). de resistencia al fuego de los fardos de paja. Elaboración propia.

| Autor | Año | Lugar | Norma | Construcción | Tiempo | Resultado |
|-------------------------------------|------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------|-------------------------------------|
| SHB Agra | 1993 | Scandia, Nueva México, EEUU | ASTME E-119 | Sin estuco | 30 | Aprobado |
| | | | | Con estuco | 120 | Aprobado |
| Universidad de California | 1996 | California, EEUU | ASTME E-119 | Con estuco | 60 | Aprobado |
| Santa Fe, Fire Dept. | 2000 | Nueva México, EEUU | 1093°C | Sin estuco | 30 | Rechazado |
| | | | | Muro de madera convencional | 35 | Quemado |
| | | | | Con estuco | 40 | Aprobado |
| GrAT Wein | 2001 | Viena, Austria | Alemania F90 | Con estuco | 90 | Aprobado |
| AUSBALE | 2002 | Australia | Australian Bushfire code AS 3959 | Con estuco | No esp. | Calificado "incombustible" Aprobado |
| DCAT | 2006 | Texas EEUU | ASTME E-119 | Estuco de barro | 60 | Aprobado |
| | | | | Estuco de cemento y cal | 120 | Aprobado |
| Universidad Técnica de Braunschweig | 2007 | Alemania | DIN EN 1365-1:1990-10 | Estuco de barro 3cm | 38 | Aprobado |
| EXPO Zaragoza | 2008 | Zaragoza, España | UNE-EN 1364-1:2000 | Estuco de barro | 91 | Aprobado |
| IDIEM, U de Chile | 2003 | Santiago de Chile | NCh 935/1 | Estuco de cemento | 120 | Aprobado |

Según artículo 4.3.3 y 4.3.4 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción chilena (OGUC) las viviendas de hasta dos pisos, deben contar de muros cortafuegos de F120, muros divisorios entre unidades de F60 y muros soportantes de F30 (MINVU 2011).

1.2.4.3. Aislación acústica

En la tabla 4 se presentan los resultados de ensayos internacionales (MAS; EVERBACH 1995) (DEVERELL et al 2009) que muestran que muros construidos con los fardos de paja con un estuco tienen una reducción acústica entre 48 y 58,9 dB(A). Artículo 4.1.6 de la OGUC, exige que los elementos constructivos que dividan o separen unidades de viviendas deban tener un índice de reducción acústica mínima de 45dB(A), con que según los ensayos internacionales y nacionales los fardos cumplirían.

Tabla 4- Resultados de ensayos de reducción acústica de los fardos de paja. Elaboración propia.

| Autor | Año | Lugar | Norma | Construcción | Reducción dB(A) |
|--|------|------------------------------|----------------|---|-----------------|
| Carl J. Mas y E Carr Everbach | 1995 | Swarthmore, EEUU | No esp. | Fardos de trigo con estuco. 20" espesor | 58,9 |
| Jasper Van de Linden | 2003 | | ISO 140-3 | Fardos con estuco de barro | 55 |
| J. Glassford | 2006 | Sídney, Australia | No esp. | Fardos de paja. Terminación no esp. | 54-55 |
| Deverell, R., Goodhew, S., Griffiths, R.y de Wilde, P. | | Genesis Centre, Somerset, UK | ISO 140:4-1998 | Fardos de paja. Terminación no esp. | 48-50 |
| IDIEM, Universidad de Chile | 2009 | Tunquén, Chile | NCh 2785 | Fardos de paja con 30mm de yeso | 45 |

1.2.4.4. Humedad

La mayor amenaza a los fardos de paja es la humedad. Para evitar la degradación de los fardos y el crecimiento de hongos es necesario mantener la humedad de la paja a no más de un 25% (SUMMERS; MATTEW 2006). Sin embargo, con el uso de los detalles necesarios, no es difícil asegurar que la humedad se mantenga bajo este nivel. El diseño de los cimientos, aleros y tapajuntas es crítico en la protección de los fardos. En climas muy lluviosos se deben proveer protección adicional con fachadas ventiladas. Además el uso de un estuco poroso permite mejor secado y evita la acumulación de la humedad. Por eso se recomienda el uso de estucos de barro o de cal. Una vivienda en el sur poniente de Inglaterra, con un clima "templado marítimo" y precipitaciones anuales de 1100mm (La precipitación anual de Concepción es 1100mm y Temuco 1157mm), presentaba una humedad relativa entre 10-17,3% de su paja adentro de los muros (CARFRAE 2011). Las mediciones se levantaron durante un periodo de 3 años, 2 años después de la terminación de la construcción de la casa. Mediciones de una casa en West Yorkshire, Inglaterra, un clima con precipitaciones anuales de 1500mm (Valdivia 1871mm), mostraban niveles promedios de 12,5% (CARFRAE 2011).

1.2.4.5 Resistencia a infestaciones

El uso de un material orgánico da lugar a la preocupación que el material va a atraer insectos, roedores y plagas. Sin embargo experiencia internacional y nacional muestra que las viviendas construidas con los fardos de paja no sufren estos problemas siempre cuando los muros están terminados por ambos lados con una buena capa continua de estuco. El estuco forma una barrera impenetrable a los insectos y en el caso de estuco de cal o pintado con cal, su resistencia a infestaciones aumenta por su propiedad astringente alcalino. Además un buen fardo de paja no debería contener semillas y por ende no hay comida para animales como roedores.

2. CELDAS DE PRUEBA FÍSICAS

Para probar la hipótesis que una vivienda construida con los fardos de paja puede proveer mejores niveles de confort higrotérmico a sus usuarios en el valle central de Chile, el Laboratorio de Energía e Iluminación de la Universidad Andrés Bello construyó tres celdas de prueba para comparar esa construcción con las típicas encontradas en el campo chileno. Las celdas fueron construidas en el Campus Casona las Condes de la Universidad, en Las Condes, en el este de Santiago de Chile.

3. METODOLOGÍA

3.1 Diseño y construcción de las celdas de prueba físicas

Para definir los sistemas de construcción típicos en el campo del Valle Central de Chile, se realizó un

catastro de un pueblo representativo, Rungue, ubicado 50km al norte de Santiago de Chile en el valle central. Los resultados del catastro mostraron que un 65% de las construcciones fueron de madera, un 25% albañilería, un 7% adobe y un 3% madera con revestimiento de zinc. Las viviendas construidas antes de 2007 y la introducción de la Reglamentación Térmica Chilena probablemente no tengan ninguna aislación térmica, sin embargo las construidas después deberían tener una máxima conductividad térmica de $1,9\text{W/m}^2\text{K}$. Además 75% de las soluciones tipo para la reconstrucción rural ofrecido por el Gobierno de Chile después del terremoto del 27 de febrero 2010 son de madera. Entonces se decidieron construir las tres celdas con los sistemas de construcción siguientes:

- i. Madera sin aislación
- ii. Madera con suficiente aislación poliestireno expandido, para cumplir con la reglamentación térmica chilena vigente $1,9\text{W/m}^2\text{K}$.
- iii. Sistema constructivo de estructura de madera y muros de fardos de paja (acostado 360mm) terminado con estuco de barro (30mm) a ambos lados. (fig.1)

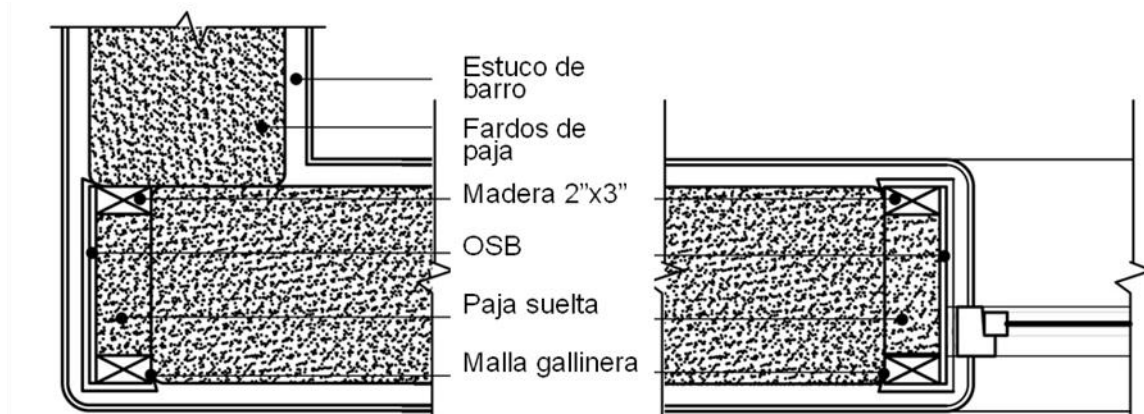


Figura 1. Detalle constructivo en planta del sistema constructivo con fardos de paja

Las celdas tienen un volumen interno de $2,45\text{m} \times 1,56\text{m} \times 1,8\text{m}$. Los techos son iguales y tienen suficiente aislación para cumplir con la reglamentación térmica chilena $0,479\text{W/m}^2\text{K}$. Tienen una ventana de vidrio simple de 3mm orientada hacia el norte de $1,5\text{m} \times 1,0\text{m}$. Entre mayo 2010 y noviembre 2011 las ventanas no tenían protección solar. Después de una revisión de las mediciones del primer año, protección solar horizontal fue diseñado e instalado por alumnos para dar 100% protección desde el equinoccio de primavera hasta el equinoccio de otoño. Se construyeron las celdas en un lugar libre de sobra y se las ubicaron para que una no daría sobra a las otras (fig.2).



Figura 2. Celdas de prueba físicas. Mayo 2010- Noviembre 2011 (sin protección solar que fue instalada noviembre 2011)

3.1.1 costos de materiales para las celdas de prueba

Los costos de los materiales comprados en 2009 son presentados en tabla 5. El costo de la mano de obra no está incluido dado que se los construyeron alumnos de la universidad. Es interesante notar que el costo de los materiales para la celda de fardos de paja fue menor que lo de la madera sin aislación.

Tabla 4- Costos de las celdas de prueba.

| Celda de prueba | Total US\$* | Costo por m2 neto. US\$* |
|----------------------|-------------|--------------------------|
| Madera sin aislación | 555 | 142 |
| Madera aislada | 631 | 161 |
| Fardos de paja | 548 | 140 |

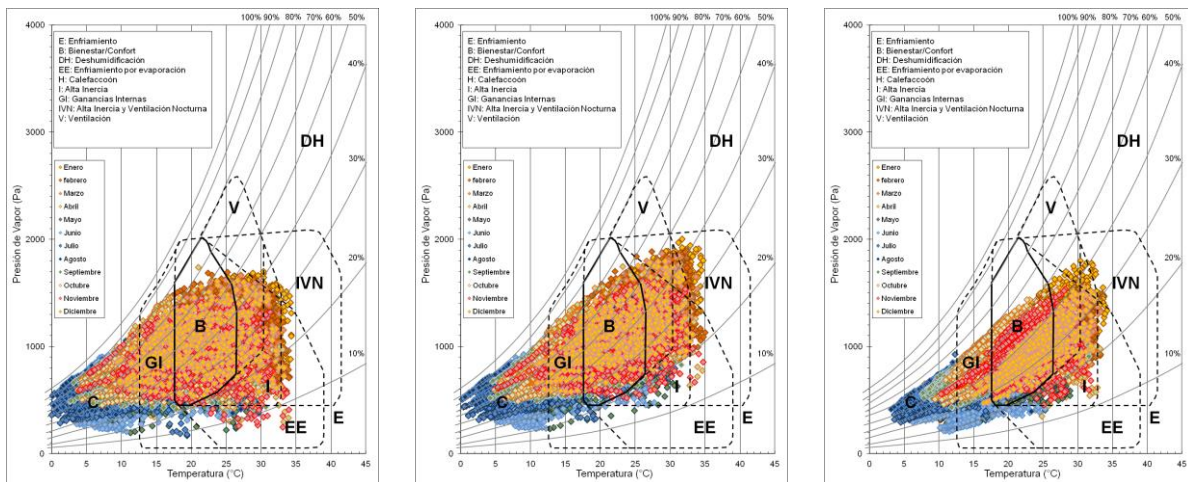
* tipo de cambio- US\$1=\$554,700 Pesos chileno.

3.2 Mediciones de Temperatura bulbo seco (°C) y humedad relativa (%RH)

Se colocaron tres data loggers (higrotermógrafos digitales) tipo Logtag Haxo-8 con capacidad para medir temperatura y humedad relativa a una altura de 1,7m arriba del suelo en las tres cámaras según la norma internacional ISO 7726. Cada hora se midieron los datos que se descargaron y analizaron una vez al mes. Se levantaron mediciones de la temperatura bulbo seco y la humedad relativa del aire exterior con una estación de clima La Crosse Technology 2317. Con las mediciones se calcularon la demanda de calefacción y enfriamiento con un rango de confort según Givoni 18°C-27°C (GIVONI 1998). Los resultados son presentados en 4.0 resultados.

4. RESULTADOS

4.1 Temperatura bulbo seco y humedad relativa



Figuras 3, 4 & 5- Cartas psicrométricas de las mediciones de la celda de madera (izquierda), la de madera aislada (centro) y fardos de paja (derecha)

4.2 Humedad Relativa

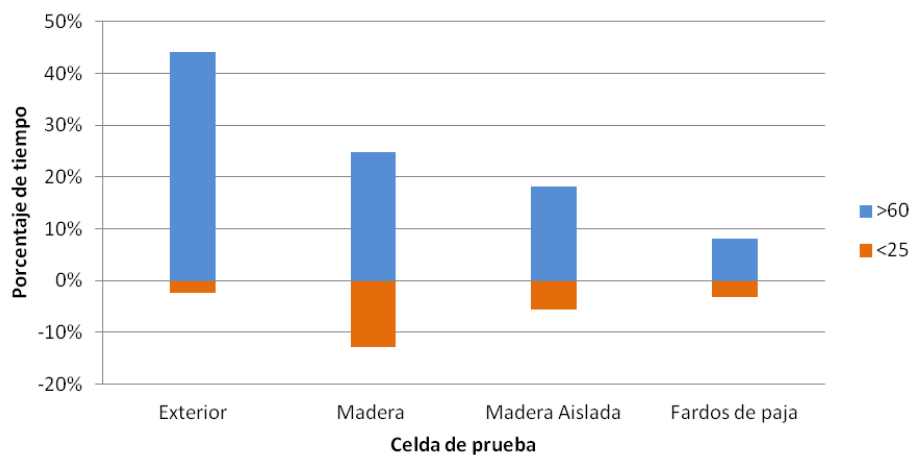


Figura 6- Porcentaje del tiempo fuera del rango 25% - 60% humedad relativa, recomendado por la salud humano

Según los resultados de las mediciones de humedad relativa levantadas durante el periodo abril 2011-marzo 2013 la celda de prueba construida con los fardos de paja mantuvo una humedad relativa del aire interior mucho más estable y baja que las de las dos celdas de madera. Figura 6 muestra el porcentaje de las horas que la humedad relativa está fuera del rango recomendable para la salud humana. Con una humedad relativa mayor que 60% existen problemas de condensación, crecimiento de hongos y enfermedades respiratorias. Cuando baja a niveles menores que 25% existen problemas con irritación de las mucosas. Entonces la construcción con fardos de paja provee menos problemas de humedad.

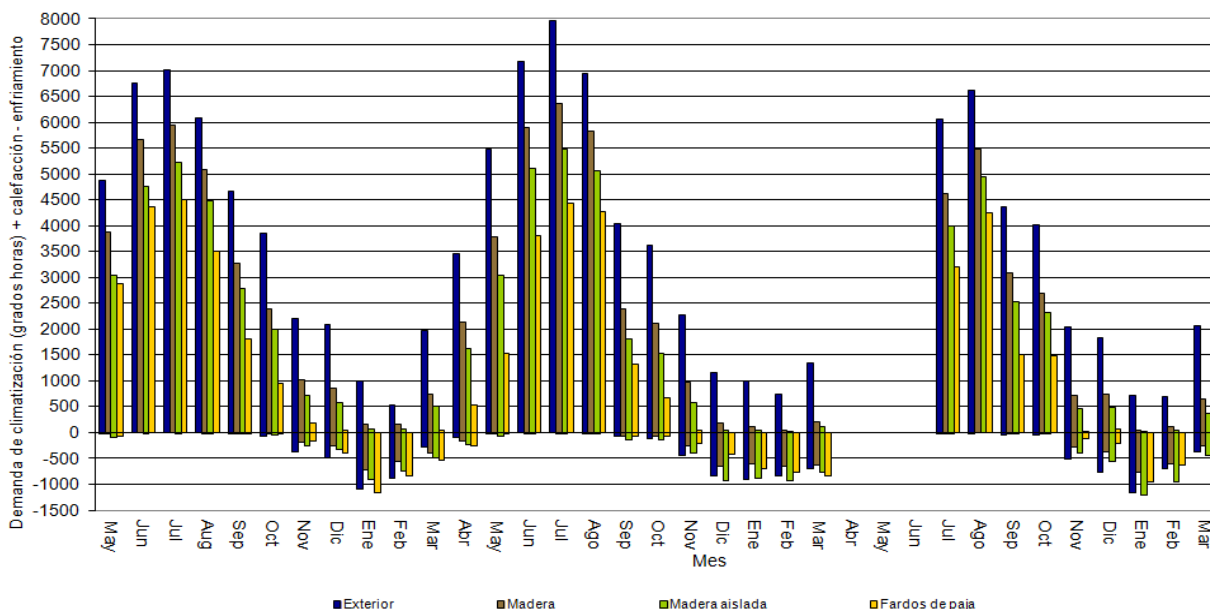


Fig.7- Demanda de calefacción (+) y enfriamiento (-). Mayo 2010-Marzo 2013

Las demandas de calefacción y enfriamiento calculadas muestran que la cámara de fardos de paja tenía una demanda de calefacción un 29% menor por el periodo marzo 2010-marzo 2013 que la cámara que cumple con la reglamentación térmica chilena (fig.3). Durante el verano 2010-2011 la demanda de enfriamiento de la cámara de fardos de paja fue mayor, sin embargo con la introducción de masa térmica adicional en la forma de 2cm de estuco de barro al interior de la celda y la instalación de protección solar a las tres cámaras, la demanda fue menor en los veranos 2011-2012 y 2012-2013.

5. CONCLUSIONES

Los resultados de los celdas de prueba muestra que la construcción con los fardos de paja podría ser una manera asequible de proveer viviendas rurales energéticamente eficientes, con una demanda de calefacción menor que una que cumple con la reglamentación vigente (fig.7) y con mejores niveles de confort higrotérmico (fis. 3-6). Esto ayudaría las zonas rurales del Valle Central de Chile dónde existen problemas de escasez de energía, contaminación aérea que resulta del uso de leña de baja calidad para calefaccionar y dónde las viviendas actuales proveen bajos niveles de confort. Al mismo tiempo el uso de los fardos de paja, un desecho agrícola, reduciría la contaminación atmosférica que resulta de quemas agrícolas y almacenaría dióxido de carbono. Dado que el sistema constructivo tiene una plástica parecida a la arquitectura patrimonial, además de tener un impacto técnico positivo, el impacto visual podría ser igualmente beneficioso.

Los ensayos internacionales y nacionales muestran que la construcción con los fardos de paja tiene una transmitancia térmica entre 0,103 y 0,334W/m²K (tabla 1.) que supera la reglamentación (MINVU 2011); una resistencia al fuego entre 38 y 120 minutos (tabla 3.) que cumple con la norma de 30 minutos para muros exteriores de viviendas hasta dos pisos y 120 minutos para medianeros (MINVU 2011); y una reducción acústica entre 45 y 58,9dB(A) (tabla 4.) que significa según la ordenanza (MINVU 2011) se puede usarla para dividir unidades. Sin embargo, los fardos de paja no aparecen en la lista de materiales certificados por la División Técnica (DITEC) del Ministerio de Vivienda y Urbanismo MINVU y por ende no se pueden utilizar para viviendas que reciban financiamiento del estado. Actualmente los autores se encuentran buscando fondos para realizar más investigaciones y empezar un diálogo con la DITEC para dar paso al uso futuro de este sistema constructivo para los que lo más necesitan.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCORN, A., DONN, M. **Life Cycle Potencial of Strawbales and Timber for Carbon Sequestration in House Construction**, en 2° International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Ancona, Italia, Junio 2010
- ANDERSEN JM, ANDERSEN BM **Straw Bale Houses design and material properties**, Danish Building and Urban Re-search, Statens Byggeforskningsinstitut, Denmark, 2004
- BOZEMAN STRAW BALE PROJECT. **The History of Straw Bale** [en línea] 2010 [Fecha de consulta 09 mayo 2012] Disponible en: <http://strawbaleproject.com/strawbalehistory.html>
- BUSTAMANTE W, CEPEDA R, MARTÍNEZ P y SANTA MARÍA H. **Eficiencia energética en vivienda social: un desafío posible. In Propuestas para Chile**: Concurso Políticas Públicas 2009. P.Universidad Católica de Chile 2009: 253-282
- CALDERA SÁNCHEZ A. **Building Blocks for a Better Functioning Housing Market in Chile**, OECD Economics Department Working Papers [en línea] OECD Publishing 2012 [Citado 22 Mar 2012]; 943. Disponible en: <http://www.oecd-ilibrary.org/>
- CARFRAE J. **The moisture performance of Straw bale construction in a températe martime climate**. Tesis (Doctorado) Environmental Building Group, School of Architecture, Faculty of Arts, University of Plymouth, 2011
- CHAMPION, C. **Seismic Response of Innovative Straw Bale Wall Systems and System Identification**, Georgia Institute of Technology, 2009 [Fecha de consulta 16 mayo 2012] Disponible en: http://nees.org/site/resources/pdfs/REU2009_Champion_Paper.pdf
- COMMINS Y STONE. **Tested R-value for Straw Bale Walls and Performance Modeling for Straw Bale Homes**. California Energy Commission. 1998
- CONTRERAS, CG. **Estimation of Emissions from Residential Wood Combustion (RWC) in Chile**. Conama -Swedish International Development Cooperation Agency (Sida).2008
- CCTP (COMISIÓN CIUDADANA-TÉCNICO-PARLAMENTARIA PARA LA POLÍTICA Y LA MATRIZ ELÉCTRICA), **Chile necesita una gran reforma energética**, Santiago de Chile, 2011
- DEVERELL R, GOODHEW S, GRIFFITHS R. Y DE WILDE P. **The noise insulation properties of non-food-crop walling for schools and colleges: A case study**. Journal of Building Appraisal; Julio 2009, Vol. 5 Issue 1, p29-40
- DIRECCIÓN METEOROLÓGICO DE CHILE, **Informe de Precipitaciones 2013**, [En línea] Santiago de Chile 2011, [citado 10 junio 2013] Disponible en: <http://www.meteochile.gob.cl/precipitacion.html>
- GIVONI B. **Climate Considerations in Building and Urban Design**. New York: Van Nostrand Reinhold 1998
- GOODHEW S GRIFFITHS R. **Sustainable earth walls to meet the building regulations**, Energy and Buildings 37 (2005) 451–459
- GÓMEZ-LOBO A., LIMA J.L.,HILL C. Y MENESES M. **Diagnóstico del mercado de la leña en Chile**, Departamento de Economía, Universidad de Chile, Santiago de Chile 2005.
- HEALY J.D. **Housing, fuel poverty, and health: A Pan-European Analysis**, Ashgate Publishing, Ltd., England 2004
- INE (Instituto Nacional de Estadística) **Cuadro 10.1: Viviendas, por condición de ocupación, según región, área urbana-rural y tipo de vivienda** INE, Santiago de Chile 2013
- INSTITUTO DE LA CONSTRUCCIÓN **Determinación de línea base “anual” para la evaluación de la inversión en eficiencia energética en el sector residencial invierno 2007 – verano 2008**. Proyecto Fomento de la Eficiencia Energética (CNE/GTZ) Santiago de Chile 2008.
- LACCINSKI P. Y BERGERON M. **Serious Straw Bale: A Home Construction Guide for All Climates**. Chelsea Green Publishing, Canadá, 2000 P.115
- LEE, C. AND GROVE, J., **Straw Yields from Six Small Grain Varieties 2003-4 and 2004-5 growing seasons**. [en línea] - University of Kentucky, 2005. Disponible en: http://www.uky.edu/Ag/GrainCrops/Research/Research_pdf/SmallGrains_StrawYields2005.pdf [citado 8 nov 2010]
- MAGWOOD, C. **Editor’s Note**, The Last Straw, 44: 3, 2004.
- MÁRQUEZ, M. MIRANDA, R. **Una estimación de los impactos en los presupuestos familiares derivados del sostenido aumento en los precios de la energía**, Universidad Austral, Chile 2007
- MAS, C.J., EVERBACH, E.C. **Acoustical Characterization of Straw Bales as Structural Elements**, en Acoustical Society of America 130th Meeting Lay Language Papers, St. Louis, Missouri, EEUU, 1995
- MINISTERIO DE ENERGÍA. **Balance Nacional de Energía 2011**, [en línea] Ministerio de energía de Chile, Santiago de Chile, 2012 [Fecha de consulta 10 junio 2013] Disponible en: <http://antiguo.minenergia.cl/>
- MINVU (MINISTERIO DE VIVIENDAS Y URBANISMO). **Avance en la entrega de soluciones habitacionales. Programa de Reconstrucción en Vivienda. Informe 31 octubre 2012** [En línea] Santiago de Chile: MINVU 2012 [Citado 20 Nov 2012] Disponible en: http://www.minvu.cl/opensite_20111122104351.aspx
- MINVU (MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO) **Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC)** [en línea] 2011 [Fecha de consulta 22 mayo 2012] Disponible en: http://www.minvu.cl/opensite_20070404173759.aspx
- MODCELL. **Modcell** [en línea] 2012 [Fecha de consulta 16 mayo 2012] Disponible en: <http://www.modcell.com/>
- ODEPA (OFICINA DE ESTUDIOS Y POLITICAS AGRARIAS), **Estadísticas de superficie sembrada de cultivos anuales a nivel nacional**, [en línea] Santiago de Chile. [Citado 1 abril 2013] Disponible en: <http://www.odepa.gob.cl>
- PIÑERA, Sebastian , **Mensaje al país del Presidente de la República Sebastián Piñera Echenique**. Gob. de Chile, Santiago 2012
- RODRIGUEZ VIVANCO CS. **Construcción con Fardos: una alternative para la Región de la Araucanía**, Tesis (Título de Ingeniero Constructor), Temuco, Chile, Universidad de la Frontera, Facultad de Ingeniería, Ciencias y Administración, Departamento de Ingeniería de obras civiles, 2007.
- SINIA (SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN AMBIENTAL), **Zonas Declaradas Saturadas** [En línea] 2011 [Citado 10 julio 2011] Disponible en: <http://www.sinia.cl/1292/w3-propertyvalue-15480.html>
- STONE N. (2003) **Thermal Performance of Straw Bale Wall System**, [En línea] Ecological Building Network, <http://www.ecobuildnetwork.org/pdfs/Thermal_properties.pdf>
- SUMMERS y MATTHEW. **Moisture and Decomposition in Straw: Implications for Straw Bale Construction**. En King, B. (Ed). Design of straw bale buildings. Green Building Press, San Rafael. 2006 p 161-172.
- THEIS B. Y KING B. **Fire**. En: King, B. (Ed). Design of straw bale buildings. Green Building Press, San Rafael. 2006 pp 173-185.
- WIMMER R, HOHENSINNER H, JANISCH L, Y DRACK M. (2001) **Heat Insulation Performance of Straw Bales and Straw Bale Walls**, GrAT - Center for Appropriate Technology / Vienna University of Technology 2001