

**USO DE LA PAJA EN LA CONSTRUCCIÓN DE PANELES AISLANTES O
ESTRUCTURALES, APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS DE CEREALES DE LA
AGRICULTURA.**



MARÍA SOL BERNAL PEÑA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

**ESPECIALISTA EN PLANEACIÓN AMBIENTAL Y MANEJO INTEGRAL DE LOS
RECURSOS NATURALES**

Director:

EDNA LINEY MONTAÑEZ HURTADO

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESPECIALIZACIÓN EN PLANEACIÓN AMBIENTAL Y MANEJO INTRAL DE LOS
RECURSOS NATURALES**

BOGOTÁ, 06 DE JUNIO DE 2018

USO DE LA PAJA EN LA CONSTRUCCIÓN DE PANELES AISLANTES O ESTRUCTURALES, APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS DE CEREALES DE LA AGRICULTURA.

USE OF STRAW IN THE CONSTRUCTION OF INSULATING OR STRUCTURAL PANELS, EXPLOITATION OF AGRICULTURE CEREAL WASTE.

María Sol Bernal Peña
Ingeniera Civil, Universidad Militar Nueva Granada.
Auditor de Ejecución, Comando de Ingenieros, Ejercito Nacional.
Bogotá, Colombia
Correo electrónico: u2700840@unimilitar.edu.co

RESUMEN

Parte de la problemática actual con relación a la conservación del medio ambiente y los recursos naturales, consiste en implementar nuevas tecnologías que sean sostenibles y amigables con este. Esto debido a que desde las últimas décadas, se ve con preocupación la afectación de las grandes industrias a los recursos naturales y en general al medio ambiente. La industria de la construcción es una de las grandes contribuyentes de las emisiones de gases efecto invernadero, y es allí donde surge la necesidad de utilizar nuevos materiales ecosostenibles que cumplan con las mismas funciones mecánicas de los materiales convencionales de construcción. Una alternativa es el uso de la Paja en paneles aislantes y estructurales, en el presente documento se revisarán los análisis que se le han efectuado a dicho material, desde los tipos de construcción más comunes, la caracterización de sus propiedades físicas hasta su comportamiento como muros autoportantes y como aislante térmico. De acuerdo a lo revisado, el posicionamiento, las dimensiones, la densidad y el pre-tensionamiento de las cuerdas de las pacas influyen de gran manera en la resistencia de las mismas, esto resulta ser perjudicial con relación a que este tipo de construcciones que son generalmente conseguidos in-situ y se realizan en zonas que no tienen la suficiente tecnología para evaluar este tipo de parámetros que garantizan su correcto funcionamiento como material estructural. Para esto, existen manuales de construcción en lo que asegura el correcto comportamiento mecánico de este material.

Palabras clave: materiales ecosostenibles, paja, paneles estructurales, paneles aislantes, pacas de paja, comportamiento mecánico.

ABSTRACT

Part of the current problem in relation to the conservation of the environment and natural resources, is to implement new technologies that are sustainable and friendly with it. This is due to the fact that in recent decades, it has been affected by the impact of large industries on natural resources and, in general, on the environment. The construction industry is one of the biggest contributors to greenhouse gas emissions, and it is there where the need arises to use new eco-sustainable materials that fulfill the same mechanical functions of conventional construction materials. An alternative is the use of straw in insulating and structural panels, this document will review the analysis that has been done with this material, from the most common types of construction, its characterization of physical properties to its behavior in the self-supporting walls and as a thermal insulator. According to the revised, the positioning, the dimensions, the density and the pre-stressing of the stings of the bales influence to extent the resistance, this turns out to be detrimental in relation to the fact that this type of construction is generally achieved in-situ and is carried out in areas that do not have enough technology to evaluate this type of parameters that guarantee its correct functioning as a structural material. For this, there are construction manuals in which ensures the correct mechanical behavior of this material.

Keywords: eco-sustainable materials, straw, structural panels, insulating panels, straw bales, mechanical behavior.

INTRODUCCIÓN

En el inicio de la década de los 70's se llevó a cabo la primera cumbre de medio ambiente realizada por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), conocida también como la cumbre de Estocolmo. En esa oportunidad se reunieron líderes mundiales para debatir acerca de la contaminación y decidiendo reunirse cada diez años para hacer seguimiento del estado del medio ambiente y analizar el impacto de las afectaciones que el ser humano genera. En las cumbres posteriores a la de Estocolmo, fue incluyéndose en la agenda el tema del cambio climático no solo con charlas y debates científicos acerca del cuidado del medio ambiente, sino también con la firma de tratados en los que los dirigentes y gobernantes

de varios países buscan implementar en la legislación de cada uno de sus territorios políticas que persigan el desarrollo sostenible disminuyendo la cantidad de emisiones y el cuidado de los recursos naturales. [1]

La industria de la construcción es una de las grandes contribuyentes de las emisiones de gases efecto invernadero, y es allí donde surge la necesidad de implementar nuevas tecnologías de construcción que sean sostenibles y amigables con el medio ambiente, de acuerdo a lo consagrado y firmado en los tratados de las cumbres de Cambio Climático. Esto significa que estas tecnologías sean capaces de reducir la cantidad de energía que se suministra para la elaboración de materiales de construcción a comparación de los métodos convencionales y así reducir

la emisión de gases efecto invernadero. El reciclaje de residuos agrícolas aplicado en la industria de los materiales de construcción es una solución eficiente, con efectos beneficiosos tanto para la industria de la construcción como para la protección del medio ambiente, lo que al mismo tiempo permite la protección de los recursos naturales. [2]

de la construcción es la emisión de Dióxido de Carbono (CO₂) en su elaboración, en la Figura 1 se muestran 25 materiales incluyendo metales, sintéticos, cerámicos y naturales u orgánicos, los cuales generan cierta cantidad de emisiones ya sean positivas o negativas, demostrando lo anteriormente mencionado.

Uno problemas de los materiales convencionales usados en la industria

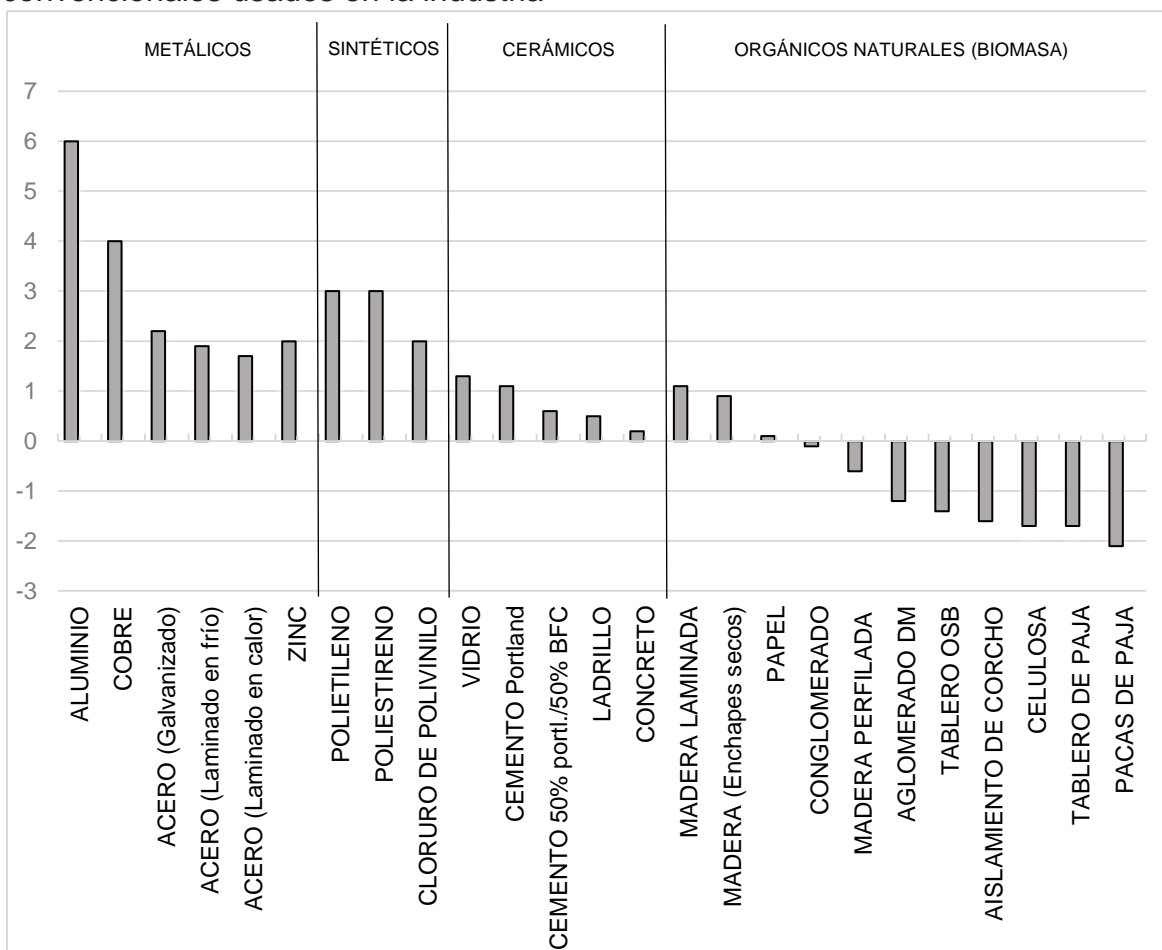


Figura 1. Emisión neta de CO₂ producida por Kg de material
Fuente: J. Wihan, 2007 [3]

La actividad agrícola, en específico la producción de cereales (trigo, arroz, cebada, etc.), genera una gran cantidad de residuos entre ellos la paja, la cual se encuentra compuesta

de tallos y hojas que habitualmente tienen diferentes destinos, La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) afirma lo siguiente al respecto:

“Antes de los fertilizantes inorgánicos, estos eran parte de la producción agrícola como alimentación de animales y como base para producción de abonos. Con los cambios en tecnologías de producción de la agricultura, se pensó que la paja podía ser quemada en campo.” [4]

Sin embargo, la actual legislación ambiental de la mayoría de los países desarrollados ha eliminado esta práctica.

Por otra parte, en otros países donde hay producción intensiva de cereales todavía se implementa esta práctica, la cual genera altas emisiones de gases efecto invernadero. Es por esto que buscar alternativas para el aprovechamiento de la paja se vuelve necesario, sobre todo en países subdesarrollados.

1. MATERIALES Y MÉTODOS.

Recientemente se han efectuado diversos estudios acerca de la utilización de la paja, las edificaciones hechas de paja son una nueva solución de construcción que utiliza pacas de paja, como elementos estructurales, de relleno o de aislamiento. Esta solución es muy común en proyectos de construcción natural o edificios verdes con bajo consumo de energía. Se ha demostrado que este es un método sostenible que utiliza materiales que contribuyen activamente a la energía necesaria para mantener la

temperatura de un edificio [5]. Por ejemplo, en el norte de China se está utilizando un método de construcción innovador para construir casas y otros edificios públicos utilizando paja de arroz residual. En Europa se tiene proyectado realizar grandes edificios de paja a partir de miles de cubos de paja comprimida que formarán las paredes centrales de un gran complejo. [6]

Más del 50% de las emisiones totales en todo el mundo provienen de la industria de la construcción y el transporte asociado a ella. Investigaciones demuestran que, si el exceso de paja en el Reino Unido se utilizara en la industria de la construcción, se podrían hacer al menos 420,000 viviendas al año. Eso significaría casi medio millón de casas construidas con materiales que absorben dióxido de carbono a lo largo de su vida [7], pues este material al ser un elemento natural tiene la capacidad de absorber CO₂ durante su crecimiento así; 10 kg de paja de trigo absorben 14 kg de dióxido de carbono, que retienen durante el plazo de su vida.

La capacidad estándar de aislamiento de pacas de paja es dos veces mejor que la requerida por las diferentes normatividades europeas, con un consumo de energía reducido en un 50%. Al mismo tiempo, las pacas de paja reducen significativamente la energía consumida en la construcción de una pared en un 90%. [5]

Este tipo de materiales son muy económicos en el sentido de su accesibilidad y cantidad, por esta razón podrían ayudar a reducir el déficit de vivienda que se presenta en muchas partes de mundo, puesto que podría proporcionar una vivienda a personas que lo necesiten.

Por otro lado, la construcción de edificios es una actividad regulada para garantizar la seguridad, la durabilidad y la habitabilidad, esto debido a que se encuentran en juego la vida de seres humanos en el caso de tener algún accidente. Garantizar la calidad constructiva de los edificios mediante la aplicación de la normatividad, es un factor a tener en cuenta sobre todo cuando se trata de buscar alternativas más ecológicas. Por todo esto, es vital la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías que, aunque estén basadas en técnicas tradicionales, permitan alcanzar todos los estándares de calidad, seguridad, sostenibilidad y de salud. [8]

Es posible desarrollar materiales biocompuestos para productos de construcción con una larga vida que protejan las fibras de la paja, en la cual se incluyan con nuevos pretratamientos y recubrimientos para mejorar en general las propiedades biocompuestas. La paja es barata, no tóxica, fácil de manejar y usar, abundante y captura de carbono. Proporciona una buena comodidad a los ocupantes del edificio y es seguro desechar al final de la vida ya que es biodegradable [6]. En especial, en un país como Colombia en el cual la

abundancia de este tipo de desecho agrícola es bastante elevada y no se toman diferentes alternativas para su uso.

Es necesario entonces revisar y analizar las propiedades intrínsecas de la paja como material de construcción para determinar su eficiencia y nivel de aprovechamiento en esta industria.

Existen algunos desafíos con las pacas de paja al momento de generar un sistema constructivo que, si se resuelven, podrían aumentar aún más su aplicación en la construcción:

1. Las direcciones de la paja son aleatorias, lo que significa que las gotas de condensación cerca del exterior podrían gotear hacia adentro y hacia abajo y la base de la pared podría volverse permanentemente húmeda con el tiempo.
2. El tamaño de la paca es determinado por el fabricante de la cosechadora, no por la estructura ingeniero o arquitecto.
3. La paja no está completamente compactada. Cuando se colocan bajo carga de pisos y techos, las pacas de paja en la pared se comprimirán. Esto puede generar una reducción de altura en la pared que podría ser de hasta 60 mm en una casa de dos pisos. Se deben hacer ajustes y rectificar los problemas dimensionales que se presenten. [6]

Otras desventajas de este material es que puede ser muy combustible, pero esto se puede mejorar si se combina con mortero o si se utilizan maquinas

pensadoras para las pacas de paja, lo cual genera escasez de oxígeno dificultando que éste se queme. Otra desventaja es que la paja es un material biológico residuo de plantaciones agrícolas, si se moja, se descompone, por lo que los muros de paja pueden deteriorarse e incluso pudrirse si no se realiza el mantenimiento necesario, o no se aplica el diseño y método adecuado de construcción, que resuelva las limitaciones de la paja como material constructivo [8]. Es allí donde se vuelve indispensable evaluar cuáles son los costos adicionales a los que se deben incurrir en la implementación de diferentes metodologías con el fin de generar un material o sistema constructivo que no cree tanta incertidumbre al momento de ser puesto en funcionamiento.

Por el contrario, existen bastantes beneficios como que es un material cuyas propiedades térmicas son muy adecuadas para su uso como aislante térmico, esto significa que es muy apropiado para sitios áridos o fríos. Igualmente, es un excelente aislante acústico, facilitando su utilización en la construcción de estudios de grabación y sonido. Otra de las ventajas es que es posible aprovechar el terreno y optimizar la superficie adecuadamente pues muchos de estos materiales se consiguen in-situ, además se le brinda la estética y apariencia a gusto de quien construye.

En cuanto a los métodos constructivos con Paja se tiene que

las construcciones de pacas de paja se pueden clasificar en tres categorías según el tipo de resistencia de la estructura: construcción con estructura de palas de paja con carga, construcción de pacas de paja con estructura de madera, construcción de pacas de paja con paneles prefabricados. [9]

La construcción con estructura de pacas de paja con carga es también llamada estilo Nebraska o Portante, Autoportante, o Muros de Carga de Paja. El nombre proviene del lugar en donde fue inventada la construcción en paja, fue en Nebraska, Estados Unidos a finales del siglo XIX [10]. En este se trata de un sistema constructivo tradicional, en el que existen los siguientes elementos:

- La cimentación y la base perimetral para el apoyo del muro.
- El propio muro, formado por pacas de paja cuya densidad mínima debe ser de 90 kg/m^3 y diseñado teniendo en cuenta que va a soportar esfuerzos de compresión.
- Zuncho perimetral en la coronación del muro y dónde se apoya la cubierta, para garantizar que el peso de la misma se reparte de manera uniforme.
- Elementos de refuerzo estructural horizontales, cada siete hiladas de altura, y verticales, para arriostrar en el sentido longitudinal del muro.
- Estacas para aportar estabilidad al muro.
- Sistema de amarre que ata la cimentación y el tejado.

- En las esquinas, guías temporales para asegurar que los muros se construyen a plomo, y grapas para estabilizar los muros. [8]

En la Figura 2 se muestra el proceso y resultado de dicho sistema constructivo.



Figura 2: Sistema constructivo Nebraska
Fuente: Construpaja Argentina, 2015 [11]

La construcción de pacas de paja con estructura de madera es también una solución tradicional. Se usó por primera vez también en los Estados Unidos a fines de la década de los 70's. De esta forma, el

peso del techo es tomado por un marco de madera y las pacas de paja son básicamente rellenos sin soportar ninguna carga. [9].



Figura 3: Sistema constructivo con estructura de madera
Fuente: Meta veinte veinte [12].

Por último, también se pueden fabricar paneles de paja mediante un proceso de compresión a alta temperatura, libre de adhesivos químicos. Estos paneles tienen mayor resistencia que los de yeso, además de mejores condiciones en cuanto a

aislamiento acústico y térmico, resistencia al fuego y al moho.



Figura 4: Sistema constructivo con paneles de paja prefabricados

Fuente: Casa de Paja, 2014 [13]

En general, una buena configuración de los paneles o pacas de paja puede explotar su resistencia intrínseca y la resistencia a la descomposición cuando se mantienen secas, y las buenas propiedades térmicas podrían desarrollarlo a favor como material de construcción. Es por esto que se han

realizado diferentes caracterizaciones físicas, morfológicas e hidráulicas. Un ejemplo fue la investigación elaborada por el grupo PROMETHE el cual, es un proyecto patrocinado parcialmente por una red para el desarrollo de biomasa no alimentaria en la región "Central" en Francia (llamado VALBIOM) [14], en este se estudiaron cuatro tipos de fibra de paja, tres de ella provenientes del trigo y una de la cebada. Primero que todo se hizo un análisis de las partículas a través de imágenes examinadas en el microscopio, seguido a esto se determinó la densidad aparente, la densidad absoluta y la porosidad; resultados que se evidencian en la Tabla 1.

Tabla 1: Densidades y porosidad de diferentes tipos de fibras de paja.

No. Paja	Densidad Aparente (Kg/m ³)	Densidad Absoluta (Kg/m ³)	Porosidad (%)
Paja 1	30	871	96
Paja 2	33	867	96
Paja 3	25	865	97
Paja 4	47	870	94

Fuente: Bouasker, N. Belayachi, D. Hoxha y M. Al-Mukhtar, 2014 [14]

Allí se evidencia que el tipo de paja No. 4; la proveniente de la cebada, tiene una densidad aparente casi del doble de las demás y que en el resto de propiedades los resultados son casi iguales. En la figura 5 se observan las curvas isotermas de adsorción-desorción, donde se

muestra el comportamiento de tres tipos de paja de trigo de acuerdo al contenido de agua con relación a la humedad relativa, se evidencia que la adsorción tiene un comportamiento muy parecido, por el contrario, la desorción disminuye en el tipo de paja proveniente de la cebada.

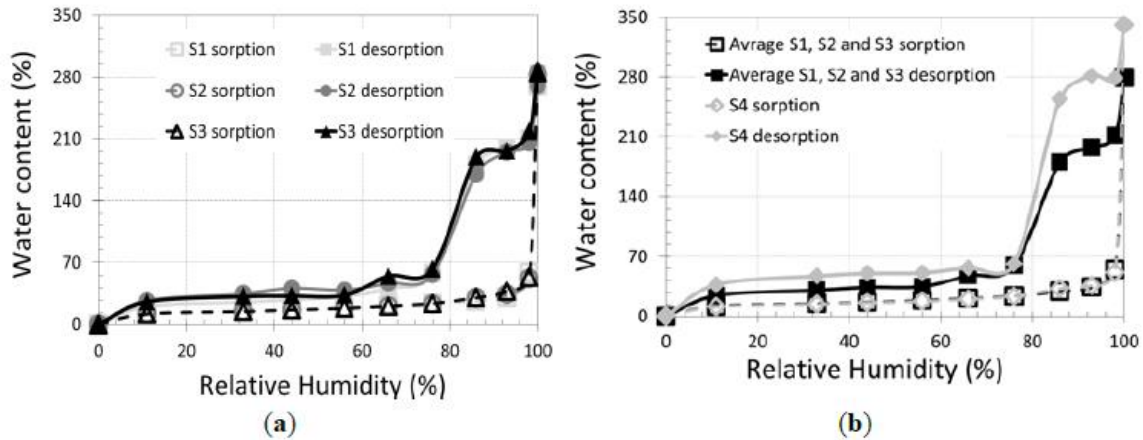


Figura 5: curvas isotermas de adsorción- desorción (a) en tres tipos de paja de trigo; (b) comparación entre las pajas de trigo y paja de cebada.

Fuente: Bouasker, N. Belayachi, D. Hoxha y M. Al-Mukhtar, 2014 [14].

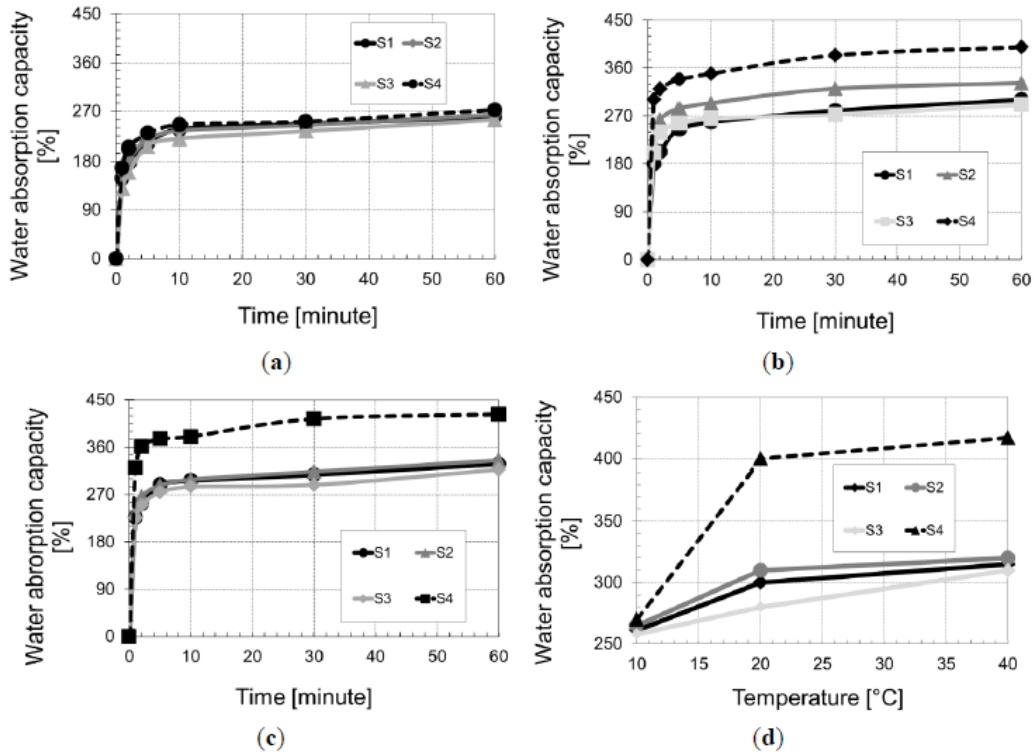


Figura 6: Capacidad de absorción de agua vs tiempo a diferentes temperaturas (a) al 10°C; (b) a 20°C; (c) a 40°C; (d) Capacidad de absorción de agua vs temperatura.

Fuente: Bouasker, N. Belayachi, D. Hoxha y M. Al-Mukhtar, 2014 [14].

En cuanto a la capacidad de absorción de agua, la Figura 6 se muestra el resultado. Allí se demuestra que es un material que tiene una gran capacidad de

absorción de agua, lo cual puede generar tanto beneficios como dificultades al momento de su implementación.

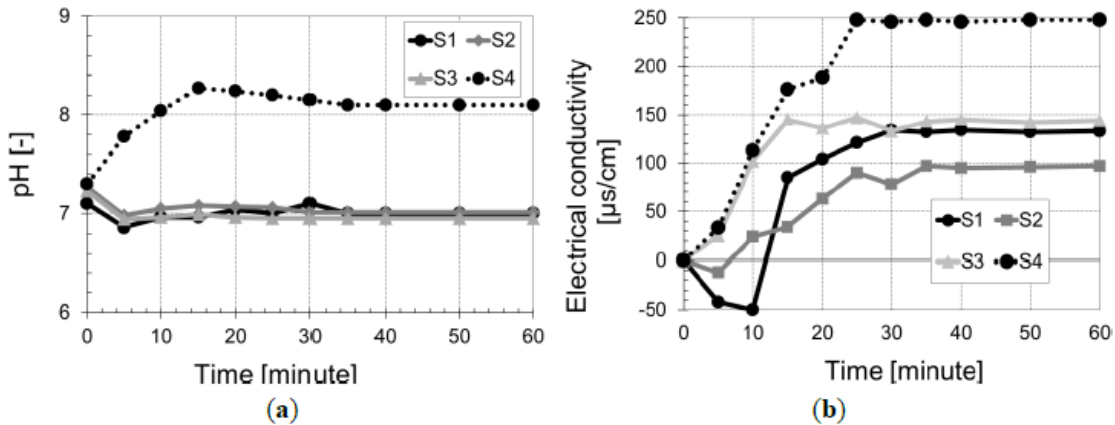


Figura 7: (a) pH y; (b) conductividad eléctrica vs Tiempo.
Fuente: Bouasker, N. Belayachi, D. Hoxha y M. Al-Mukhtar, 2014 [14].

En la Figura 7 se muestran diferencias en el pH entre la paja proveniente del trigo y la que proviene de la Cebada, al igual que en la conductividad eléctrica. Todas estas propiedades deben ser tenidas en cuenta al momento de decidir de qué manera o configuración es más eficiente el uso de este tipo de materiales para la construcción.

Por otro lado, es importante mencionar que se han desarrollado ampliamente las técnicas de construcción con las pacas de paja, lo cual se evidencia en el Manual de Construcción Práctica de Edificios de Pacas de Paja [15], en donde se detalla cada procedimiento que se debe seguir para garantizar la compactación y correcta instalación de las pacas de paja con el fin de evitar las posibles dificultades mostradas con anterioridad.

Lo anterior debe complementarse a través de estudios técnicos acerca del comportamiento mecánico de las pacas de paja usadas para la construcción. Es por esto que deben

traerse a colación las investigaciones que se han adelantado al respecto para tener certeza del comportamiento estructural de este tipo de construcción.

De acuerdo a lo anterior, Lecompte y Duigoy (2017), en su estudio llamado “Mecánica de pacas de paja para aplicaciones de construcción”, analiza la resistencia a la compresión y características de elasticidad de dos diferentes lotes de paja provenientes de granjas orgánicas y convencionales de años diferentes de cosecha. Esto con el fin evaluar el uso de pacas de paja como panel estructural y entender un poco más el uso de esa tecnología [16].

Se evaluó el comportamiento a la compresión de estos dos tipos de lotes, conociendo sus propiedades iniciales como la densidad de las pacas de paja, la densidad aparente de la paja, el contenido de humedad de las pacas de paja y las dimensiones de las pacas. En la Tabla 2 se muestran los parámetros anteriormente mencionados.

Tabla 2: Descripción de las pacas de paja para cada lote.

Lotes	No. De pacas de paja	Densidad de las pacas (Kg/m ³)		Densidad aparente (Kg/m ³)	Contenido de humedad de las pacas de paja (%)	Dimensiones de la paca (cm)		
		Promedio	Desviación estándar			Espesor	ancho	Rango de longitud
Lote 1	60	66	±4	39	~9%	37	49	80-100
Lote 2	123	93	±5.6	53	~20%	37	48	75-95

Fuente: Lecompte, T. Le Duigou, A, 2017 [16]

Se analizó igualmente el comportamiento en dos posiciones de las pacas de paja, es decir de manera horizontal; colocando el lado más largo en la parte de abajo y de manera vertical; colocando el lado más corto en la parte de abajo. Este estudio fue comparado y fundamentado en el modelo de compresión propuesto por Jones [17]. En este modelo se propone que, si un material presenta un mayor valor de compresibilidad, igualmente mostrará una mayor reducción de volumen bajo una presión dada [16], logrando así variación de la densidad inicial de la paca. Esto sucede en los muros autoportantes conformados por pacas de paja, los cuales se ubican tradicionalmente de forma horizontal como se muestra en la Figura 8, estas reciben la presión de las pacas ubicadas arriba de ellas generando la deformación de la altura inicial de paca, es por esto que en el estudio de Lecompete también se aplica el modelo de compresión para determinar dicha deformación.

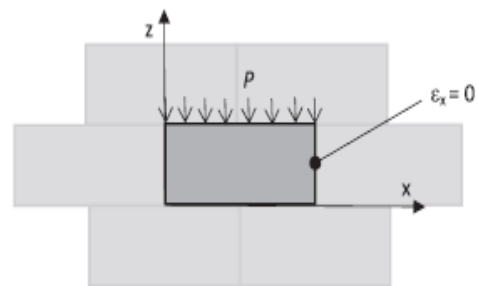


Figura 8: Una paca contenida en una pared y sus condiciones de entorno.

Fuente: Lecompte, T. Le Duigou, A, 2017 [16].

Melardi et al. (2016) también propuso un modelo en el cual se evaluaron 84 muestras diferentes tipos de pacas de paja provenientes de trigo, arroz, avena, cebada, maíz, sorgo y mijo. Aplicando cargas de compresión con el fin de valorar la influencia de la orientación de la paja, el material de origen, la densidad y de las cuerdas pretensadas con las que se arman las pacas [18]. El modelo utilizado se basó en dos parámetros que se ajustan a la curva de fuerza – desplazamiento, cuyo comportamiento se define en dos fases; la primera es un estado lineal seguido de un estado no lineal de rigidez. Dicho modelo dedujo la relación de la resistencia a la compresión con la densidad, y por

esa razón este parámetro fue calculado arrojando como resultado que las densidades de las diferentes pacas de paja varían desde 66 Kg/m^3 hasta 161 Kg/m^3 . Aplicando este modelo se logró determinar y analizar los diagramas de fuerza – desplazamiento de cada una de las pacas de paja ubicadas también en dos posiciones diferentes; como en el estudio de Lecompte et al., y en las dos fases de comportamiento determinadas anteriormente. De igual manera se determinaron los patrones de deformación a través del módulo de Young y el coeficiente de Poisson con el fin de determinar la elasticidad del material, es decir su capacidad para deformarse ante una carga axial [19].

Otro de los usos más útiles de la paja como material de construcción es como paneles aislantes de temperatura. Para este caso, Miron et al. En su publicación denominada “Paneles aislantes térmicos a base de paja y caña”, compara la densidad aparente y la conductividad térmica de varias muestras de caña y paja combinadas con materiales aglutinantes como el Alcohol de Polivinilo o el cemento [20]. Esto con el fin de determinar las ventajas del uso de materiales naturales, como la paja y los desechos de la caña, en comparación con los materiales usados comúnmente en la construcción en el aislamiento térmico.

2. RESULTADOS Y DISCUSIONES

2.1. Caracterización física de la paja

De acuerdo al estudio realizado por Bouasker et al., se tiene lo siguiente; en cuanto a las propiedades físicas resultantes en la Tabla 1, de acuerdo a los resultados obtenidos, se muestra que la densidad absoluta de los cuatro tipos de densidad varía entre 865 y 871 Kg/m^3 , en cambio la densidad aparente tiene diferencias en un valor que corresponde a la paja proveniente de la cebada, siendo un 45% más alta que demás. Con respecto a la porosidad, se observa que los valores arrojados en la investigación son altos en comparación con otros materiales de origen orgánico, la alta porosidad demuestra la facilidad de usar este material en la fabricación de materiales para el aislamiento térmico, debido a que los materiales porosos tienden a almacenar aire en su interior, lo cual resulta en la disminución de la conductividad eléctrica y por ende la capacidad de impedir la transferencia de calor [21].

En relación a las curvas isotermas de adsorción y desorción, se observó que ambas curvas presentan diferentes tendencias, esta condición se denomina histéresis que consiste en obtener para la misma muestra en estudio diferentes contenidos de humedad a una misma estado de humedad relativa [14]. Otro aspecto a resaltar es la curva de desorción en el

tipo de paja 4, que aumenta cuando se encuentra cerca de llegar a la saturación, con relación a la curva de los promedios entre los tres primeros tipos. Este resultado indica que la paja tiene una buena capacidad de regulación hídrica y a su vez proporciona buena comodidad higrotérmica.

El parámetro de capacidad de absorción de agua fue analizado en función del tiempo y a tres diferentes temperaturas. Los resultados obtenidos varían entre 270 y 400% y según lo observado en las gráficas alcanza un valor bastante alto desde el inicio del ensayo, esto indicaría que a corto plazo puede generar dificultades en el momento de la construcción, debido a que el material se encontraría saturado y el agua contenida se podría mezclar con los materiales aglutinantes que se usen de acuerdo al sistema constructivo. Sin embargo puede ser beneficioso a largo plazo, ya que el agua contenida en las pacas de paja puede reducir la contracción [14].

El pH de las muestras analizadas, resulto ser neutro en la mayoría de los casos, sin embargo en la muestra 4 (paja de Cebada), se evidencia un aumento en la alcalinidad acelerado ente el minuto 10 y el 20, para luego estabilizarse en un pH básico. Este aumento en el pH puede significar la disminución en los tiempos de fraguado del concreto cuando se realizan mezclas con dicho material en las pacas de paja. En cuanto a la conductividad eléctrica, se observa

un crecimiento acelerado hasta alcanzar entre los 80 y los 250 $\mu\text{s}/\text{cm}$ en los primeros 25 minutos, luego de eso logran estabilizarse.

2.2. Comportamiento mecánico de las pacas de paja en construcción.

De acuerdo a lo indicado Lecompte et al., se determinó un modelo en el cual se puede calcular la tensión a la cual estaría sometida una paca de paja ubicada en un muro autoportante, conociendo las propiedades iniciales del material como su densidad real, densidad aparente y las dimensiones de la paca; esto asumiendo la pretensión de los cables y las cargas muertas que recibiría el muro. El resultado arrojado en la modelación indica un estado crítico de compactación para el cual la presión aplicada por la maquina compactadora asegura la rigidez suficiente de las pacas, en este estado crítico se identificó una relación entre la densidad real y la densidad aparente de 2.5. También se determinó que la posición de las pacas de paja ya sea vertical o horizontalmente, influye en el comportamiento de las pacas, que de igual manera depende de la pretensión ejercida por las cuerdas colocadas en el empaquetamiento de las pacas, debido a que no solo cumple el papel de ajustar las pacas; también puede ayudar a brindar mayor rigidez frente a las cargas verticales.

De igual forma, el estudio Melerdi et al. Demostró que el modelo implementado es capaz de describir el comportamiento mecánico de las pacas de paja bajo compresión, especialmente a altos niveles de tensión, donde ocurre una rigidez significativa de las pacas [18], esto se describe claramente en el comportamiento de la segunda fase de la curva fuerza-desplazamiento, donde se muestra un estado no lineal y se alcanza la mayor rigidez; el desplazamiento asintótico de la curva en esta fase es un parámetro que determina la rigidez de la bala, se encontró que es aproximadamente igual a la altura de la paca para la ubicadas horizontalmente, y al ancho de la paca para las ubicadas verticalmente. En cambio cuando hay niveles de tensión bajos, este material se comporta de manera lineal, es esta fase se logró determinar que el módulo de Young es proporcional al cuadrado de la densidad de las pacas.

También se determinó con respecto a este modelo que la transición entre la inicial y el régimen de rigidez se produce aproximadamente al 25% de la tensión vertical.

2.3. Comportamiento de las pacas de paja como material aislante térmico.

Para que un material sea considerado bueno para ser utilizado como material aislante, su conductividad termina debe ser inferior a $0,01 \text{ w / mk}$. De acuerdo a los resultados arrojados en el análisis realizado por Miron et al., las muestras hechas de paja y algunas en combinación con caña son bastante aptas para su

utilización en paneles aislantes, pues los resultados varían entre 0.07 a 0.09 w / mk .

3. CONCLUSIONES

Luego de hacer la revisión de los diferentes análisis de la caracterización de la paja se puede inferir que la densidad aparente de la paja es más baja en comparación a otros materiales celulosos como el cáñamo o las astillas de madera. Su porosidad es alta, lo cual demuestra la facilidad de usar este material en la fabricación de materiales para el aislamiento térmico. También se evidenció que la paja resulta ser un material con buena capacidad de regulación hídrica y comodidad higrotérmica. Por otra parte, se demostró que es un material que puede absorber una gran cantidad de agua, siendo esto beneficioso en el sentido estructural pues puede disminuir la deformación de las pacas de paja en el momento de ser usadas como paneles autoportantes, pero puede ser contraproducente en el sentido que dicha acumulación de agua puede reaccionar con los materiales aglutinantes presentes en la construcción como el cemento, haciendo que se genere un medio básico y se disminuya el tiempo de fraguado generando incluso la pérdida de algunas propiedades del cemento.

Sin embargo, la correcta compactación y tensionamiento de las pacas de paja al momento de ser armadas puede generar que se

disminuya el valor de absorción de agua garantizando que no ocurran interacciones con los materiales que se colocan alrededor.

En cuanto al comportamiento mecánico de las pacas de paja se puede deducir que la correcta configuración de las pacas de paja puede generar la suficiente rigidez para soportar las cargas producidas por un muro autoportante, esto quiere decir que el posicionamiento, las dimensiones, la densidad y el pretensionamiento de las cuerdas de las pacas influyen de gran manera en la resistencia de las mismas, tal y como se muestra de acuerdo a los modelos propuestos en los estudios de Lecompte et al. Y Melerdi et al. Esto puede ser algo perjudicial con relación a que este tipo de construcciones con materiales naturales son generalmente conseguidos in-situ y se generan en zonas que no tienen la suficiente tecnología para evaluar este tipo de parámetros que garantizan su correcto funcionamiento como material estructural. El Manual de Construcción Práctica de Edificios de Pacas de Paja de Murray Hollis [15], proporciona información completa acerca de cómo configurar y armar las pacas de paja para alcanzar resultados óptimos.

Con respecto a la utilización de la paja como material aislante, es importante resaltar que en casi todos los estudios revisados se determina que las propiedades intrínsecas de la paja son bastante favorables para su

función de material aislante, de acuerdo al resultado obtenido en el parámetro de porosidad y conductividad eléctrica y térmica.

En general, la paja es un material usado desde mucho antes de aparecer los materiales convencionales de construcción, y muchas estructuras realizadas en el siglo XIX aún siguen en pie, esto significa que es un material bastante durable y útil para este tipo de usos, lo cual se comprueba en la revisión de los diferentes estudios realizados a la paja. Sin embargo, se deben tener las características óptimas mencionadas y demostradas en los estudios mencionados.

REFERENCIAS

- [1] A. Vengoechea, «Las Cumbres de la Naciones Unidas sobre Cambio Climático,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.fes-energiayclima.org/>. [Último acceso: 1 junio 2018].
- [2] C. Aciu, «Use of Sawdust in the Composition of Plaster Mortars,» *ProEnvironment*, pp. 30-34, 2014.
- [3] J. Wihan, «Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw,» 2007. [En línea]. Available: http://www.enertech.fr/pdf/45/humidite_murs_paille.pdf.
- [4] J. Suite, CONSERVACIÓN DE HENO Y PAJA, para pequeños productores y en condiciones pastoriles, Roma: ORGANIZACIÓN

DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN, 2003.

- [5] A. Cantor, M. Dana y D. Manea, «Using Wheat Straw in Construction,» *ProEnvironment*, pp. 17-23, 2015.
- [6] S. Ghaffar, «Straw fibre-based construction,» de *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*, London, Woodhead Publishing, 2017, pp. 257-283.
- [7] F. Gouthier-Gignac y J. Vittrup, «Environmental Impacts of Passive Houses,» 2007. [En línea]. Available: <http://www.strawworks.co.uk/wp-content/uploads/2014/11/passivhouseimpact.pdf>.
- [8] P. Serrano, «Arquitectura sostenible y ecológica utilizando paja como material constructivo,» [En línea]. Available: <http://www.certificadosenergeticos.com/arquitectura-sostenible-ecologica-utilizando-paja-material-constructivo>.
- [9] A. Adedeji y J. Bello, «Construction Procedure of a Straw Bale Walled Building – a review, *Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal Of Engineering*, IX,» 2011, p. 255–262.
- [10] Red de Construcción con Paja, «Estilo “Nebraska” (Muros de Carga de Paja),» 8 Febrero 2014. [En línea]. Available: <https://casasdepaja.org/wiki/como-construir/item/215-estilo-%E2%80%9Cnebraska%E2%80%9D-muros-de-carga-de-paja>. [Último acceso: 4 junio 2018].
- [11] Red Argentina de Construcción con Fardos de Paja, «Sistema Nebraska,» 5 Julio 2015. [En línea]. Available: <https://construpajaargentina.wordpress.com/2015/07/05/sistema-nebraska/>. [Último acceso: 1 Junio 2018].
- [12] META2020 arquitectos, «CONSTRUCCIÓN CON PAJA,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.meta2020arquitectos.com/construccion-con-paja/>. [Último acceso: 1 Junio 2018].
- [13] Okambuva casas de paja, «PANELES PREFABRICADOS DE PAJA EN BIOCULTURA,» 28 Abril 2014. [En línea]. Available: <http://casadepaja.es/paneles-prefabricados-de-paja-en-biocultura/>. [Último acceso: 1 Junio 2018].
- [14] M. Bouasker, N. Belayachi, D. Hoxha y M. Al-Mukhtar, «Physical Characterization of Natural Straw Fibers as Aggregates for Construction Materials Applications,» 2014. [En línea]. Available: www.mdpi.com/journal/materials.
- [15] M. Hollis, *Practical Straw Bale Building*, Melbourne: Land Links, 2005.
- [16] L. T y L. A, «Mechanics of straw bales for building applications,» *Journal of Building Engineering*, pp. 84-90, 2017.
- [17] W. Jones, *Fundamental Principle of Powder Metallurgy*, Londres: Edward Arnold Publisher Ltd., 1960.
- [18] M. Maraldi, L. Molari, N. Regazzi y G. Molari, «Analysis of the parameters affecting the mechanical behaviour of straw bales under

compression,» *biosystems engineering*, nº 160, pp. 179-193, 2017.

- [19] L. Velez, *Materiales industriales, teoría y aplicaciones*, Medellín: Instituto Tecnológico Metropolitano, 2008.
- [20] I. O. Miron, D. L. Menea y A. Mustea, «Reed and Straw-Based Thermally Insulating Panels,» *ProEnvironment*, nº 9, pp. 9-15, 2017.
- [21] V. Luque, «Ecogreenlan,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.ecogreenlan.com/?product=celulosa-aislante>. [Último acceso: 1 Junio 2018].
- [22] S. Curlinga, N. Laflina, G. Daviesa, G. Ormondroyd y R. Elias, «Feasibility of using straw in a strong, thin, pulp moulded packaging material,» *Industrial Corps and Products*, pp. 395-400, 2016.