

Caracterización de Paneles de Paja y su Evaluación Estructural en una Edificación de Tres Pisos

Ramos, Henry^{1,*} ; Viera, Paulina² 

¹Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Programa de Maestría de Investigación en Ingeniería Civil mención en Estructuras, Sangolquí, Ecuador

²Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Quito, Ecuador

Resumen: La crisis climática y energética actual ha resaltado la importancia de investigaciones orientadas a buscar alternativas más eficientes y menos contaminantes para cubrir las necesidades de la humanidad. La construcción de viviendas es una de ellas. A través de procedimientos establecidos en el código residencial de construcción con paja IRC y en las normas ASTM, este trabajo trata acerca de la caracterización de paneles portantes fabricados a base de paja, molduras de madera y un revoco ligero, con el objetivo de que sean utilizados como estructura en edificaciones aisladas térmicamente y seguras estructuralmente. Se han encontrado las propiedades mecánicas de los paneles mediante la ejecución de ensayos como compresión axial y tensión diagonal. Con estos datos, se creó un modelo computacional de una edificación de 3 pisos de altura, donde se propone su uso, debido a las ventajas de eficiencia energética que estas edificaciones brindan por la presencia de la paja. Se obtiene que los paneles cuentan con una resistencia a compresión y a corte de 5.92 MPa y 0.38 MPa respectivamente, con un módulo de elasticidad de 424.08 MPa y rigidez a corte de 157.11 MPa. Mediante el análisis del modelo de la edificación, se concluye que los prefabricados estudiados pueden ser utilizados de forma segura para el montaje de edificaciones de mediana altura, al presentar derivas inelásticas inferiores al 1 % y un comportamiento sismo resistente adecuado. Estos resultados permiten anticipar que es posible utilizar estos materiales menos contaminantes para la construcción de casas que fomenten la sostenibilidad.

Palabras clave: Paja, compresión, tensión, prefabricados

Characterization of Straw Panels and their Structural Evaluation in a Three-Story Building

Abstract: The current climate and energy crisis has highlighted the importance of research aimed at finding more efficient and less polluting alternatives to meet the needs of humanity. Housing construction is one of these. Through procedures established in the IRC residential strawbale construction code and ASTM standards, this work deals with the characterization of load-bearing panels made of strawbale, wood moldings and a light plaster. With the objective of being used as a structure in thermally insulated and structurally safe buildings. The mechanical properties of the panels were determined by performing tests such as axial compression and diagonal tension. With these data, a computational model of a 3-story building was created, where their use is proposed, due to the advantages of energy efficiency that these buildings provide by the presence of straw. It is obtained that the panels have a compressive and shear strength of 5.92 MPa and 0.38 MPa respectively, with a modulus of elasticity of 424.08 MPa and shear stiffness of 157.11 MPa. Through the analysis of the building model, it is concluded that the studied prefabricated materials can be safely used for the assembly of medium-rise buildings, since they present inelastic drifts of less than 1% and an adequate seismic resistant behavior. These results allow us to anticipate that it is possible to use these less polluting materials for the construction of houses that promote sustainability.

Keywords: Straw, compression, tension, prefabrication

1. INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción a través del tiempo ha generado un gran impacto social y económico al ofrecer condiciones de

viviendas dignas a nivel mundial (Marqués et al., 2019). Además, de garantizar oportunidades de empleo (Lima et al., 2020). Sin embargo, esta industria es la causante de generar altos impactos negativos relacionados con el medio ambiente (Tlajji et al., 2022). Por lo que es necesario incluir estrategias

*haramos@uce.edu.ec

Recibido: 20/05/2024

Aceptado: 29/01/2025

Publicado en línea: 28/02/2025

10.33333/rp.vol55n1.03

CC 4.0

de sostenibilidad enfocadas al uso de los recursos naturales (Cornaro et al., 2019).

Una medida eficaz para lograrlo, consiste en la construcción de viviendas mediante el empleo de materiales biodegradables como la paja (Pachala & Rosero, 2016). Que en conjunto con la madera reducen los impactos ambientales (Santamaría & Sagñay, 2024). Por lo tanto, se establece la necesidad de generar investigaciones enfocadas a la caracterización de las propiedades mecánicas de estos materiales (Echeverría, 2019), que contribuyan a entender el comportamiento sísmico en las edificaciones (García, 2022). Entre las más importantes tenemos: su densidad, resistencia a compresión axial, resistencia a corte, módulo de elasticidad, módulo de corte. Estas viviendas presentan mejores propiedades de aislamiento térmico y acústico que las convencionales (Viel et al., 2019), lo que permite reducir la energía consumida necesaria para la calefacción y refrigeración durante su funcionalidad (Augustynska, 2020). Esto optimiza el confort térmico, las condiciones de salud y vida de las personas que las habitan y la reducción en el impacto ocasionado por el ruido urbano (Lehner et al., 2021).

A su vez el fomento de una economía circular que incentive la recuperación de los residuos en el campo de la construcción (Mihmic & Salihbegovic, 2021), es una estrategia clave para generar una industria eficiente vinculada con el uso de los recursos (Zhang et al., 2021). Por este motivo se plantea el manejo de materiales naturales renovables como la paja, obtenida como subproducto de las actividades agrícolas (Hasan et al., 2021). De esta manera, se reducirá la demanda de arena y cemento comúnmente utilizados en la construcción, que generan residuos que afectan al medio ambiente (Yin et al., 2023).

La paja es un desecho agroindustrial que se produce a partir de la cosecha de cereales como el arroz, cebada y el trigo (Viera et al., 2020). En Ecuador, actualmente no tiene un uso significativo (Ramos & Viera, 2023); los agricultores la queman en el campo o la utilizan como alimento del ganado sin ofrecer mayor aporte nutricional (Hussein et al., 2019). Sin embargo, la paja ya ha sido utilizada hace algunos años como material de construcción (Teslik, 2021), en forma de pacas o bloques rectangulares atados con hilos a los que se conoce comúnmente como fardos (Hernández et al., 2020).

Las pacas de paja son utilizadas como material aislante de relleno en las paredes de las edificaciones (Cascone et al., 2019), que en complemento con otros materiales como la madera pueden cumplir la función de muros portantes (Huixiang et al., 2021). El Código Residencial Internacional de construcción con paja IRC (2018), indica que las mismas deben presentar un contenido de humedad no mayor al 20 % para evitar su pudrimiento, caso contrario no podrá ser aprovechada para estos fines. Mientras que las reglas francesas de construcción con paja establecen una densidad en las pacas de entre 80 kg/m³ y 120 kg/m³ para ser utilizadas en las edificaciones como parte de elementos estructurales (Marques et al., 2019).

Las ventajas del uso de la paja durante la construcción de edificaciones, radica principalmente en la reducción de la emisión de gases efecto invernadero (Hon & Kraniotis, 2020). Que se ven en aumento para los materiales convencionales desde su fabricación hasta su puesta en obra (Tachaudomdach & Hempao, 2022). Al fomentar su uso en la construcción se logra evitar la quema de este desecho, valorizando la actividad y economía agrícola (Yin et al., 2020). Su combustión ocasiona la generación de gran cantidad de monóxido de carbono (CO₂) principal causante de la contaminación ambiental (Díaz et al., 2020).

El desconocimiento sobre el manejo y las propiedades de este desecho para el levantamiento de edificaciones, como la ausencia de normativas en Ecuador sobre la construcción con paja (Viera et al., 2023), que permitan seguir diferentes directrices técnicas, ha ocasionado que profesionales relacionados con la construcción no puedan confiar ni difundir soluciones enfocadas a la sostenibilidad (Sabapathy & Gedypudi, 2018). A pesar de ello, se pueden encontrar varias investigaciones donde se ha estudiado las propiedades de materiales contruidos con pacas de paja, como su comportamiento higrotérmico, acústico, densidad, humedad y característica estructurales (Njike et al., 2020).

Viera et al. (2023) evalúan una metodología a partir de modelos estructurales para edificaciones contruidas con pacas de paja y mochetas de madera. Los resultados obtenidos son comparados con pruebas experimentales mediante el uso de sensores. Concluyen que los periodos obtenidos con los modelos planteados presentan una variación del 6.4 % respecto a los valores arrojados mediante vibración estructural, lo que demuestra que el sistema estructural planteado es una alternativa eficiente para la edificación de viviendas unifamiliares.

Dukarska et al. (2021) estudian el tamaño de partículas, densidad aparente y contenido de humedad de tres tipos de paja, colza, centeno y triticale, utilizadas en la elaboración de tableros. Para todos los casos se tienen diversas geometrías de partículas que inciden en las propiedades de los tableros. La paja de centeno presenta la más baja densidad y por ende garantiza una alta compresión en los tableros, obteniéndose módulos de elasticidad y a corte mayores comparados a las otras fibras. Dimova et al. (2021) investigan la incidencia del espesor de paneles con paja y marcos de madera en el aislamiento térmico de edificaciones, se logra concluir que el espesor óptimo a fin de lograr un excelente aislamiento térmico rentable es de 45 cm.

Makovicka et al. (2021) analizan el comportamiento al fuego de ecopaneles compuestos por paja comprimida y confinados con láminas de cartón de 40 mm de espesor. Para esta investigación se construye a pequeña escala probetas de 50 x 100 mm y 100 x 200 mm con un espesor de 30 mm. Se logra concluir que en su gran mayoría el fuego actúa únicamente en la superficie de las probetas de forma lenta y sin alcanzar la matriz de paja, el tiempo de combustión fue de 10 minutos y la pérdida máxima en peso promedio de los ecopaneles es del 6.4 %.

Chen et al. (2021) estudian muros de corte en acero laminado en frío con pacas de paja y un revestimiento de cemento con malla de alambre. Se realizan ensayos de carga cíclicas, concluyendo que los elementos de acero soportan la carga vertical, mientras que las pacas trabajan como material de relleno beneficiando el aislamiento térmico y acústico. El revestimiento con la malla de alambre soporta la carga lateral, además se concluye que cuando las conexiones de los muros están compuestas por tornillos y arandelas su resistencia a corte, rigidez lateral y ductilidad es de 43.94 kN/m, 12.10 kN/mm y 4.35, respectivamente.

El presente estudio tiene como finalidad identificar las características mecánicas de paneles contruidos con paja, molduras de madera y un revestimiento. Posteriormente, estas son utilizadas en la validación de un modelo computacional de una vivienda de 3 pisos de altura contruida con este tipo de prefabricados, con la finalidad de encontrar las respuestas estructurales y verificar su comportamiento sismo resistente. Como primer paso, se comprueba que el contenido de humedad de la paja previamente comprimida en pacas no sea mayor al 20 % y la densidad aparente oscile entre 80 kg/m³ y 120 kg/m³, con el objetivo de validar su uso como material de construcción y garantizar su adecuado comportamiento.

Luego, se caracterizó al mortero de revestimiento previamente diseñado y la madera utilizada para la elaboración de las molduras. Se establece la configuración del prefabricado y se realiza la construcción de 6 paneles con revestimiento, 6 paneles sin revestimiento y 6 molduras de madera de 120 cm de largo, 120 cm de altura y 35 cm de espesor. Mediante la ejecución de ensayos a compresión axial y a tensión diagonal de los mismos, se ha logrado determinar propiedades como: resistencia a compresión axial y diagonal, módulo de elasticidad y módulo de rigidez a corte. Finalmente, se ha creado un modelo estructural de una edificación de 3 pisos donde se han ingresado las propiedades obtenidas de los paneles con el revestimiento.

Se logra concluir que la paja a más de trabajar como material de relleno dentro del panel, esta puede aumentar las solicitaciones ante cargas cortantes hasta un 41.57 %, sin embargo, su contribución ante las solicitaciones de cargas a compresión es mínima. El mortero de revestimiento y las molduras de madera son quienes absorben gran parte de las cargas a compresión y a corte. Además, aquellas viviendas de mediana altura y que han sido edificadas con este tipo de prefabricados presentan un adecuado comportamiento estructural, siendo seguras y sísmicamente resistentes.

2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para caracterizar a los paneles prefabricados y evaluar su comportamiento estructural en una edificación, parte con la selección del diseño y construcción de un panel estándar. Estos están compuestos por pacas de paja comprimida, molduras de madera y un revestimiento que ha sido diseñado y caracterizado previamente siguiendo los procedimientos establecidos por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (NTE INEN), Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), normas internacionales como la

American Society of Testing and Materiales (ASTM) y Código Residencial Internacional de construcción con paja (IRC).

Para garantizar el uso, durabilidad y buen comportamiento de la paja dentro del panel, la misma tuvo que ser comprimida. Por lo tanto, se fabricaron 24 pacas donde se evalúa su contenido de humedad y la densidad aparente, según los requerimientos del IRC (2018). Las propiedades de la madera (Laurel del Oriente, *Nectandra* sp.) utilizada para el montaje de las molduras, fueron obtenidas del catálogo de madera estructural de la universidad del Azuay (Espinoza et al., 2020).

Una vez caracterizados estos materiales, se procedió con el montaje de los paneles (pacas de paja, molduras de madera y revestimiento), para la obtención de su módulo de elasticidad, módulo de rigidez a corte, resistencia a compresión y resistencia a corte, mediante la ejecución de ensayos destructivos, según las normas nacionales NTE INEN 3153 (2020) y NEC-SE-MP (2015) e internacionales ASTM C1314-14 (2016) y ASTM E519-07 (2010).

Con el objetivo de evaluar la contribución de la paja de las molduras de madera y del revestimiento dentro del panel ante las solicitaciones de cargas, se determinan adicionalmente las propiedades de los paneles sin aplicarse el revestimiento y únicamente de las molduras de madera, mediante la ejecución de los mismos ensayos. Finalmente, se estudia el comportamiento estructural de los paneles en una edificación de 3 pisos de altura, mediante el uso de un software de análisis estructural. Aquí se ingresan las propiedades de los paneles obtenidas mediante los ensayos. Se analizan las respuestas estructurales como participación de masa modal, periodos de vibración y derivas, conforme los requisitos que establece la norma NEC-SE-DS (2015).

2.1 Configuración y dimensiones del panel

Para establecer la forma del panel a estudiarse en la investigación, se ha seleccionado la configuración de un panel estándar como se muestra en la Figura 1. Las Figura 1(a), 1(b), 1(c) indican a detalle la estructura del panel completo, sin recubrimiento y solo de las molduras de madera respectivamente.

La estructura cuenta con 8 elementos de madera de 4.5 x 9.5 cm de sección, 4 se colocan de forma vertical a manera de columnas y los 4 restantes se colocan de forma horizontal a manera vigas. Tanto arriba como abajo se instalan tableros de 1.2 cm de espesor, que se unen a los elementos verticales mediante 2 tornillos de 8 mm de diámetro y 12 cm de largo, dispuestos de forma paralela. Mientras que para unirse con los elementos horizontales, se colocan en los extremos y en el centro de los mismos 2 tornillos de 4 mm de diámetro y 5 cm de largo, como se indica en la Figura 1d.

Las dimensiones de las molduras pueden variar en su largo, altura y espesor conforme a la distribución arquitectónica de las edificaciones a construir. El espesor para el panel estándar es 35 cm, sin embargo, esta medida puede alcanzar hasta 45 cm. Para el largo y ancho se adoptó una dimensión de 120 cm,

tomando como referencia el tamaño mínimo del espécimen para ensayarse a compresión diagonal conforme lo establece la norma ASTM E519-07 (2010), mientras que, para ejecutar el ensayo a compresión la norma ASTM C1314-14 (2016) señala que, la relación entre la altura (120 cm) y el espesor (35 cm) del panel debe estar entre 1.3 hasta 5.0.

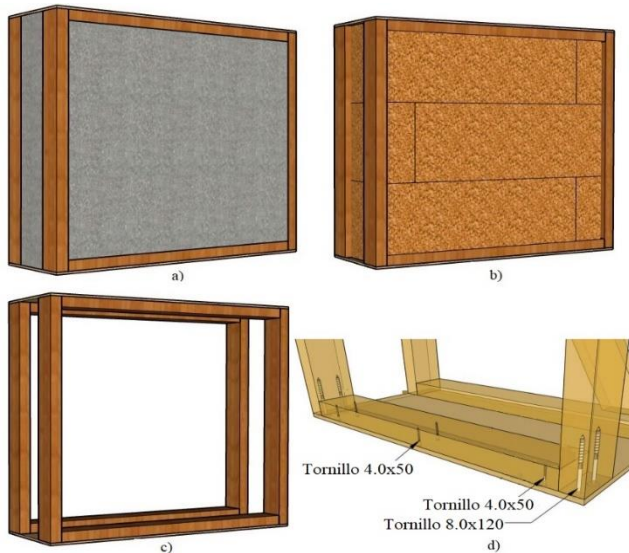


Figura 1. Configuración del panel estándar: a) con revestimiento, b) sin revestimiento, c) molduras de madera, d) detalle de uniones

Como material de relleno del panel, se utilizó paja de arroz previamente comprimida en pacas, distribuida uniformemente en toda la moldura. Para el revestimiento, se aplicó una capa de mortero aligerado de 2 cm de espesor, elaborado con cal, cemento y perlita. Previo a su colocación se instala una malla de alambre para una mejor distribución del mortero dentro del panel. En la Figura 2, se presenta el proceso constructivo de los paneles, que han sido construidos durante la investigación. En la Figura 2(a), se muestra el procedimiento utilizado para el montaje de las molduras de madera, en la Figura 2(b), la colocación de las pacas de paja dentro del panel y en la Figura 2(c), se presenta el vertido del mortero de revestimiento.



Figura 2. Proceso constructivo de paneles: a) ensamblaje de molduras, b) colocación de pacas, c) vertido del mortero de revestimiento

2.2 Paneles de estudio

En la Tabla 1 se indica el número de especímenes ensayados y nomenclatura establecida para cada uno.

Tabla 1. Codificación y número de paneles de estudio

Ensayo	Código	Panel	Cantidad
Compresión axial	MC1	Moldura de madera + paca de paja + revestimiento	3
	MC2	Moldura de madera + paca de paja	3
	MC3	Moldura de madera	3
Tensión diagonal	MT1	Moldura de madera + paca de paja + revestimiento	3
	MT2	Moldura de madera + paca de paja	3
	MT3	Moldura de madera	3

2.3 Materiales

El arroz es uno de los cereales que más se consume y cosecha en el mundo, su siembra depende de las características geográficas del lugar (Walker et al., 2020). Según datos censales obtenidos en Ecuador, en el 2021 se produjeron 1 504 214 toneladas de arroz, en una superficie de 340 281 hectáreas, con un rendimiento de 4.42 Tn/ha (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2022). Esto ha ocasionado que en el país se generen cantidades significativas de paja de arroz, que no tiene ningún uso y que puede aprovecharse. Diariamente, se producen 14 000 toneladas de desechos, donde el 56.20 % son orgánicos y el 43.80 % son inorgánicos (Ministerio del Ambiente y Agua, 2020).

La inclusión de la paja en la construcción incentiva las prácticas sobre las construcciones sostenibles, por su disponibilidad local y los impactos sociales que involucran la actividad agrícola (Mutani et al., 2020). Para el presente estudio, la paja se recolectó en la provincia de Los Ríos, cantón Buena Fe, Ecuador. Después de 3 meses de haberse cosechado el arroz, la paja se dejó secar en el mismo terreno. La paja presenta una longitud promedio de 50 cm.

Posteriormente, para comprimirla en pacas fue necesario la construcción de una máquina de madera de prensa horizontal (Viera & Ramos, 2022). Se fabricaron 24 pacas de 90 cm de largo, 45 cm de alto y 35 cm de ancho, de cada una se determinó su peso, humedad y densidad aparente. El IRC (2018), señala que las pacas deben presentar un contenido de humedad no mayor al 20 % para considerarlas aptas en la construcción. Porcentajes superiores de humedad en las pacas ocasionan el pudrimiento de la paja (Yin et al., 2018), contribuyendo al apareamiento de insectos, bacterias y hongos, lo que la hace no idónea para la construcción (Walker et al., 2020).

Como lo indica el IRC (2018), la densidad aparente de las pacas de paja se calcula con la Ecuación 1. Este valor de acuerdo con investigaciones como las desarrolladas por Huixiang et al. (2021), Marques et al. (2019), no deberá ser inferior a 80 kg/m³, ya que a menores densidades las pacas no garantizan un buen aislamiento térmico, acústico y resistencia al fuego en las edificaciones.

$$D.c = \frac{W - (W * \%w)}{V} \quad (1)$$

Donde:

D.c: Densidad corregida de la paca de paja.

W: Peso de la paca de paja.

%w: Humedad de la paca de paja.

V: Volumen de la paca de paja.

El mortero utilizado para el revestimiento de los paneles consiste en una mezcla de 50 % de cal, 50 % de cemento, perlita, agua y aditivo acelerante al 2.5 %, su dosificación en kilogramos para 1 m³ del mismo es, cal: 205.71 kg, cemento: 261.82 kg, perlita: 552.40 kg, agua: 371.62 kg, aditivo: 13.09 kg. Este fue diseñado siguiendo los parámetros establecidos en las normas NTE INEN 488 (2019) y NTE INEN 2518 (2010). Posee una resistencia a compresión de 7.19 MPa y una densidad de 1.45 g/cm³, por lo tanto, cumple con la resistencia mínima de 6.89 MPa que deben tener los morteros de cemento y cal para ser utilizados como revestimiento en paredes portantes construidas con pacas de paja, conforme lo señala el IRC (2018).

Los morteros a utilizarse para estos fines, deben ser permeables al vapor de agua (Zhang et al., 2018). Aquellos elaborados a base de cemento y arena no lo son (Walker et al., 2020). Mientras los que tienen en su composición cal presentan una aceptable permeabilidad (Pavia & Brennan, 2018), controlando la humedad dentro y fuera del panel. De esta manera lo que se evita es el pudrimiento de la paja y con ello la presencia de xilófagos.

La madera utilizada para construir las molduras es de laurel del oriente. Fue seleccionada conforme a los lugares de producción en Ecuador y por su alta resistencia a las plagas y al agua, que deberá poseer al estar siempre en contacto con la paja. La norma NEC-SE-MD (2015) señala que la madera debe presentar condiciones adecuadas de curado, con un contenido de humedad inferior al 19%. Para evitar el apareamiento de termitas y gorgojos, debe ser tratada mediante preservantes de tipo creosotas, oleosolubles o hidrosolubles, que al ser aplicados sobre la madera, la hace resistente a los xilófagos.

No se realizó ningún tipo de ensayo en la misma, sin embargo, para caracterizarla se utilizó el catálogo de madera estructural del Ecuador, que es un aporte de la Universidad del Azuay desarrollado en el año 2018.

2.4 Ensayo a compresión axial en paneles

Para la ejecución del ensayo, se colocaron 2 medidores de desplazamientos (LVDTs), con la finalidad de obtener los desplazamientos definitivos se calcula el promedio entre los mismos. Los LVDTs son colocados sobre la celda de carga como se muestra en la Figura 3a, se conectan a una caja UPM HBM de 80 canales que permite la recopilación, procesamiento de datos de carga en kg y desplazamientos verticales en mm cada 5 segundos.

Se aplicó una carga continua y uniforme sobre el panel dispuesto horizontalmente, con velocidad de 0.03 mm/s conforme lo indica la norma ASTM C1314-14 (2016), la cual deberá ser conveniente hasta alcanzar la mitad de la carga máxima esperada, mientras que el resto de la carga se aplica entre 1 y 2 minutos. El sistema de carga está conformado por un cilindro hidráulico cuya capacidad es 100 toneladas y una celda de carga con capacidad de 20 toneladas, que es dirigida por una bomba hidráulica de 10000 Psi.

2.5 Ensayo a tensión diagonal en paneles

Para la ejecución del ensayo, se dispone de 6 medidores de desplazamientos (LVDTs), 4 miden desplazamientos verticales y son colocados 2 sobre la celda de carga y 2 en la parte inferior del panel, mientras que, 2 miden desplazamientos horizontales y se colocan 1 en cada esquina lateral del panel, como se muestra en la Figura 3b.

Con la finalidad de determinar el desplazamiento vertical y horizontal definitivo, se obtiene un promedio de los desplazamientos obtenidos con los LVDTs. Para la ejecución del ensayo el panel, se colocó a 45° de inclinación respecto a la horizontal, se aplicó una carga continua y uniforme en las esquinas del mismo, con una velocidad de 0.01 mm/s conforme lo indica la norma ASTM E519-07 (2010), esta deberá ser conveniente hasta alcanzar la mitad de la carga máxima esperada, mientras que el resto de la carga se aplica entre 1 y 2 minutos.

2.6 Módulo de elasticidad de paneles

Con los datos obtenidos de las cargas aplicadas en el ensayo a compresión axial de los especímenes estudiados, se determinan los esfuerzos a compresión con la Ecuación 2, como lo indica la norma ASTM C1314-14 (2016). Además, se identifica su máximo valor.

$$f_{mt} = \frac{P}{A_t} * F_{ce} \quad (2)$$

f_{mt}: Esfuerzo a compresión del espécimen.

P: Carga límite ejercida sobre el espécimen.

A_t: Área transversal del espécimen perpendicular a la carga.

F_{ce}: Factor por esbeltez del espécimen.

Posteriormente, se calcula el promedio de los registros de los desplazamientos verticales medidos por los LVDTs, estos son utilizados para determinar las deformaciones unitarias con la Ecuación 3, descrita en la norma ASTM C469 (2009).

$$\varepsilon = \frac{L_o - L}{L_o} = \frac{\Delta}{L_o} \quad (3)$$

Δ: Variación de la longitud del elemento después de la aplicación de la carga (Desplazamiento vertical promedio medido con los LVDTs).

L_o: Longitud inicial del elemento.

L: Longitud final del elemento después de la aplicación de la carga.

Mediante la aplicación de las ecuaciones presentadas se construyen las curvas esfuerzos vs deformaciones unitarias de cada espécimen, de las cuales se obtienen el módulo de elasticidad aplicando, el método de la cuerda tangente, que se describen en las normas ASTM C469 (2009) y MNX-C-464-ONNCCE (2010). A continuación, se indica la Ecuación 4 utilizada para su cálculo.

$$Em = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad (4)$$

Em: Módulo de elasticidad de espécimen.

σ_2 : Esfuerzo axial al 40 % de la carga límite.

σ_1 : Esfuerzo a axial en una deformación unitaria de 0.00005.

ε_2 : Deformación unitaria para σ_2 .

2.7 Módulo de rigidez a corte de paneles

Utilizando el registro de cargas aplicadas durante el ensayo a tensión diagonal de los especímenes estudiados, se determinan los esfuerzos a corte con la Ecuación 5, que se indica en la norma ASTM E519-07 (2010). Además, se identifica su máximo valor.

$$S_s = \frac{0.707P}{A_{neta}} \quad (5)$$

Ss: Esfuerzo a corte del espécimen.

P: Carga aplicada en el espécimen.

A_{neta}: Área neta del espécimen.

Según la norma ASTM E519-07 (2010), para determinar el área neta de los especímenes se utiliza la Ecuación 6.

$$A_{neta} = \left(\frac{we + he}{2} \right) te * n \quad (6)$$

A_{neta}: Área neta del espécimen.

we: Ancho del espécimen.

he: Altura del espécimen.

te: Espesor del espécimen.

n: Porcentaje de área sólida del espécimen expresada en decimales.

Posteriormente, se calcula el promedio de los registros de los desplazamientos verticales y horizontales medidos por los LVDTs, estos serán utilizados para determinar las deformaciones angulares con la Ecuación 7, descrita en la norma ASTM E519-07 (2010).

$$\gamma = \frac{\Delta H + \Delta V}{g} \quad (7)$$

γ : Deformaciones angulares.

ΔV : Variación de la longitud del elemento paralela a la carga (Desplazamiento promedio horizontal medido con los LVDTs).

ΔH : Variación de la longitud del elemento perpendicular a la carga (Desplazamiento vertical medido con los LVDTs).

G: Distancia de medición entre los LVDTs.

Mediante la aplicación de las ecuaciones indicadas, se construyen las curvas esfuerzos cortantes vs deformaciones angulares de cada espécimen, de las cuales se obtiene el módulo de rigidez a corte siguiendo la misma metodología utilizada para la obtención del módulo de elasticidad, que se describe en las normas ASTM C469 (2009) y MNX-C-464-ONNCCE (2010). A continuación, se indica la Ecuación 8 utilizada para su cálculo.

$$Gm = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\gamma_2 - 0.00005} \quad (8)$$

Gm: Módulo de corte.

τ_2 : Esfuerzo a corte al 40 % de la carga límite.

τ_1 : Esfuerzo a corte en una deformación angular de 0.00005.

γ_2 : Deformación angular para τ_2 .

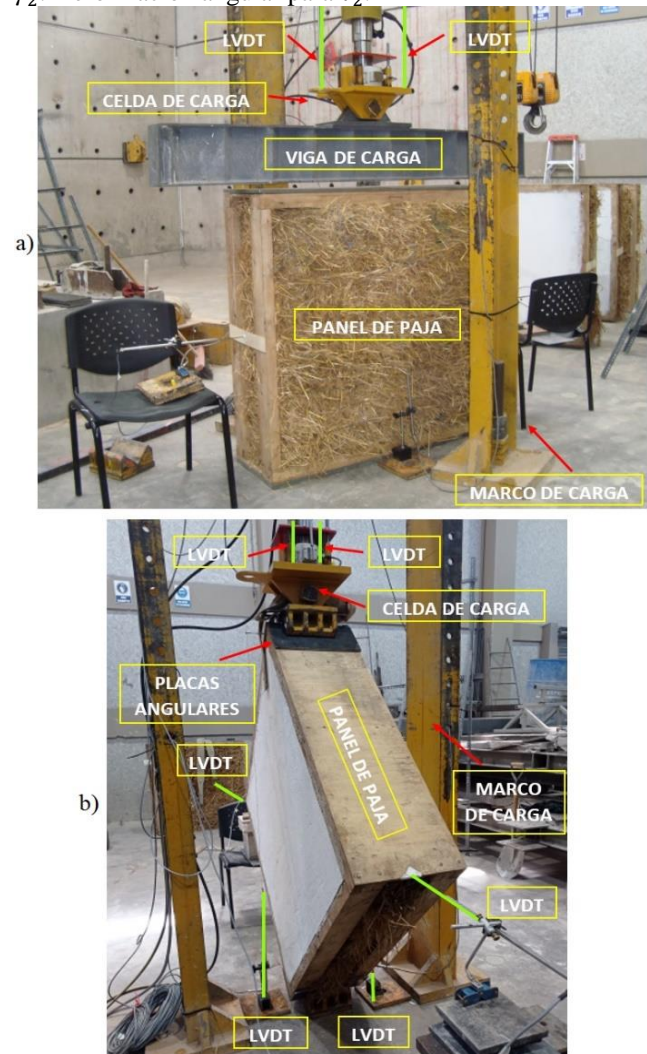


Figura 3. Ensayos en paneles: a) compresión axial, b) tensión diagonal

2.8 Modelamiento de paneles en una edificación de 3 pisos

Para la evaluación estructural de los paneles, se creó un modelo computacional de una edificación mediante el uso de un software comercial. Este permite la creación de nuevos materiales como el estudiado en esta investigación, a través de la modificación de las propiedades mecánicas. La edificación analizada corresponde a una vivienda familiar de 3 pisos de

altura con 132.60 m² de construcción, diseñada con paneles de paja. Su forma es rectangular, el largo mide 15.60 m y el ancho 8.50 m. Las alturas de entre piso en los dos primeros niveles miden 2.40 m y en el último nivel mide 3.40 m debido a la altura de las cerchas, además cuenta con una cubierta de dos aguas, como se muestra en la Figura 4a.

En el nivel N ± 2.40 m y N ± 4.80 m, se tienen entablados de piso de 3.5 cm de espesor, las vigas principales y secundarias de la estructura de madera miden 250 x 250 mm y 65 x 140 mm respectivamente. Mientras que las vigas superiores e inferiores de las cerchas y sus puntales cuentan una sección de 65 x 140 mm. Para todos estos elementos, se utilizaron las propiedades mecánicas de la madera tipo B que se indican en la norma NEC-SE-MD (2015). La madera tipo B cumple con los requerimientos técnicos para utilizarla en elementos estructurales, además tiene alta resistencia frente a los ataques microbiológicos de insectos y se ha comprobado que no presenta deficiencia en el secado.

Los paneles con paja, molduras de madera y mortero de revestimiento son considerados portantes, se modelan como elementos tipo walls de espesor 35 cm y se colocan de acuerdo a la distribución de espacios establecida para la edificación, como se indica en la Figura 4b.

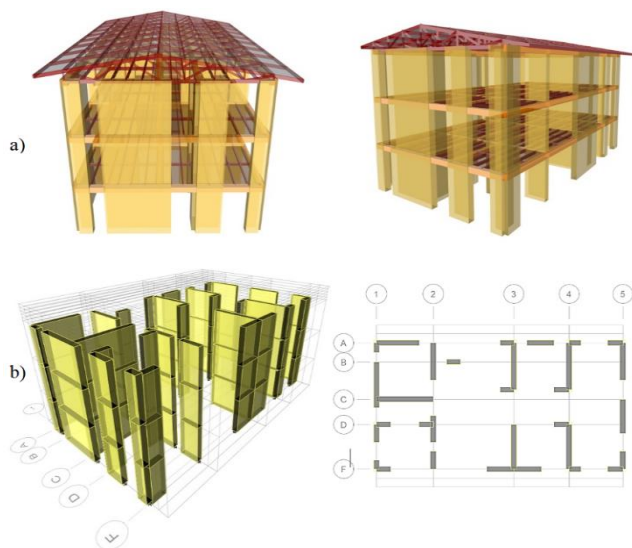


Figura 4. a) Vivienda de 3 pisos con paneles, b) distribución de los paneles en la vivienda

Las propiedades mecánicas de los paneles con paja, molduras de madera y revestimiento consideradas dentro del modelamiento y que han sido obtenidas a partir de los ensayos a compresión axial y tensión diagonal son las siguientes: densidad de 298.16 kg/m³, resistencia a compresión de 5.92 MPa, resistencia a corte de 0.38 MPa, módulo de elasticidad de 424.08 MPa y módulo de rigidez a corte de 157.11 MPa.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 5a, se indican los valores de las humedades obtenidas para las 24 pacas de paja fabricadas durante la investigación. Una de las pacas posee una humedad de 21%, que es superior a la máxima permitida del 20 % como lo indica el IRC (2018). Sin embargo, las 23 pacas restantes presentan

humedades inferiores al valor admisible. Por lo tanto, se tiene que el 96 % de las pacas de paja es ideal para ser utilizado dentro la construcción y tan solo el 4 % no es apto puesto que presenta humedades superiores al 20 %.

Con los valores del contenido de humedad, se procedió a obtener las densidades aparentes de cada una de las pacas, sus resultados se muestran en la Figura 5b. De esta manera, se puede evidenciar que una de estas presenta una densidad de 70.61 kg/m³ la cual es inferior a 80 kg/m³, mientras que las pacas restantes superan este valor. Por consiguiente, el 96 % de las pacas de paja de arroz es aceptable para utilizarlas en la construcción de edificaciones, al presentar densidades aparentes superiores a 80 kg/m³, garantizando así excelentes propiedades térmicas, acústicas y alta resistencia al fuego en las edificaciones (Teslik, 2021).

En investigaciones, donde se desee utilizar fibras naturales como la paja para la construcción de edificaciones, las metodologías de ensayo están orientadas en la calidad del material y su durabilidad. En el caso de esta fibra, su contenido de humedad es determinante. Un valor adecuado garantiza que su presencia dentro del panel no genere problemas de descomposición a futuro y posteriormente contribuya al apareamiento de hongos y moho en las viviendas.

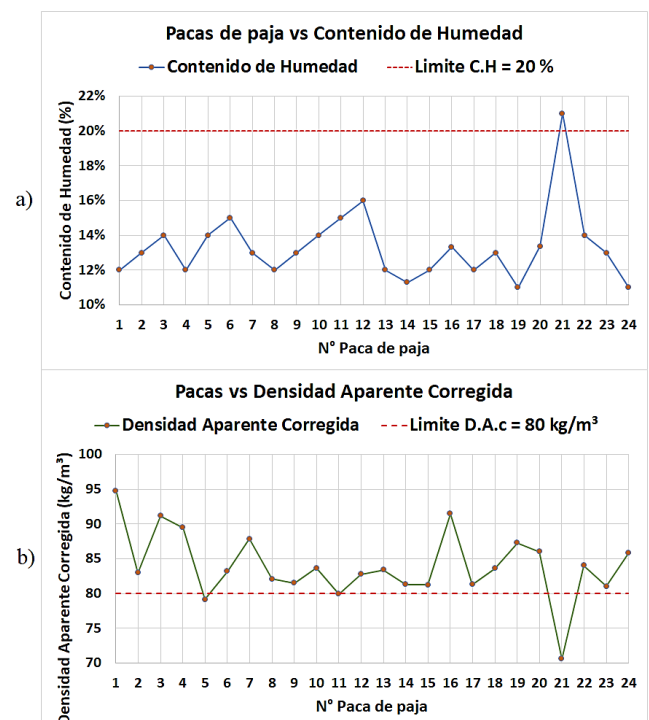


Figura 5. Propiedades de las pacas de paja: a) contenido de humedad, b) densidad aparente corregida

Los resultados obtenidos mediante la ejecución de ensayos realizados en los paneles, se pueden replicar siguiendo la metodología planteada, mediante la utilización de otras fibras naturales, siempre y cuando se utilice paja que no tenga un contenido de humedad superior al 20 %. La presencia de lignina en los tallos de arroz, cebada, trigo, avena aumenta su impermeabilidad, mientras que las fibras naturales como el heno cuentan con gran cantidad de clorofila, lo que ocasiona que sus tallos almacenen gran cantidad de agua aumentado así

su humedad e impidiendo su uso como material de construcción.

Con los resultados obtenidos de los desplazamientos horizontales y cargas registradas durante la ejecución del ensayo a compresión axial de los paneles (MC1), paneles sin revestimiento (MC2) y molduras de madera (MC3), se construyeron las curvas esfuerzos vs deformaciones unitarias. Para cada tipo de espécimen, se efectuaron 3 ensayos, obteniéndose de esta manera 3 curvas y una adicional la cual es el promedio de las otras, como se indica en la Figura 6. En la Figura 6(a), se indican las curvas esfuerzos axiales vs deformaciones unitarias de los paneles (MC1), en la Figura 6(b) para (MC2) y en la Figura 6(c) para (MC3).

En la Tabla 2, se muestran las cargas y esfuerzos máximos obtenidos para los especímenes de estudios, además se indican los módulos de elasticidad y su valor promedio, determinados mediante el método de la cuerda tangente aplicado en las curvas de la Figura 6.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los paneles MC1, MC2, MC3

Panel	Id	Carga kN	fm MPa	Pmd (fm) MPa	Em MPa	Pmd (Em) MPa
Paja + moldura + revoco	MC1-1	182.78	5.38		403.46	
	MC1-2	182.49	5.37	5.37	411.73	424.08
	MC1-3	182.78	5.38		457.05	
Paja + moldura	MC2-1	87.76	3.67		263.22	
	MC2-2	86.35	3.61	3.65	307.05	303.33
	MC2-3	88.08	3.68		339.73	
Moldura	MC3-1	15.31	3.58		467.18	
	MC3-2	15.71	3.67	3.60	352.71	351.65
	MC3-3	15.12	3.54		235.07	

El esfuerzo a compresión axial de los paneles con paja, molduras de madera y mortero de revestimiento es de 5.37 MPa mientras que su módulo de elasticidad es igual 424.08 MPa. Estas propiedades mecánicas se ven claramente afectadas disminuyendo su valor en un 32.03 % y 28.47 %, respectivamente, cuando a los paneles no se les ha colocado el mortero de revestimiento. Por lo tanto, este elemento no solo cumple la función de proteger a la paja ante agentes externos como el sol y la lluvia, sino que también aumenta la resistencia a compresión del panel hasta 1.72 MPa, lo que contribuye igualmente al aumento de su rigidez hasta 120.75 MPa.

La resistencia a compresión de los paneles donde no se ha colocado el mortero de revestimiento es de 3.65 MPa, mientras que, su módulo de elasticidad es igual 303.33 MPa. Al evaluar las mismas propiedades, pero ahora únicamente de la moldura de madera, se evidencia que este desecho agroindustrial es capaz de aumentar la resistencia a compresión de la moldura en 1.37 % y reducir su módulo de elasticidad hasta un 13.74 %. Por lo tanto, la paja no aporta resistencia considerable a la moldura, pero aumenta su flexibilidad, es esta quien absorbe

casi el 100 % de las cargas aplicas, sin embargo, la paja trabaja únicamente como material de relleno.

Mientras tanto, con los resultados obtenidos de desplazamientos verticales, horizontales y cargas registradas durante la ejecución del ensayo a tensión diagonal de los paneles (MT1), paneles sin recubrimiento (MT2) y molduras de madera (MT3), se construyeron las curvas esfuerzos cortantes vs deformaciones angulares. De igual manera, para cada tipo de espécimen se efectuaron 3 ensayos, obteniéndose de esta manera 3 curvas y una adicional la cual es el promedio de las mismas como se indica en la Figura 6. En la Figura 6(d), se indican las curvas esfuerzos cortantes vs deformaciones angulares de los paneles (MT1), en la Figura 6(e) para (MT2) y en la Figura 6(f) para (MT3).

En la Tabla 3, se indican las cargas y esfuerzos cortantes máximos obtenidos para los especímenes de estudios, además se muestran los módulos de rigidez a corte y su valor promedio, determinados mediante el método de la cuerda tangente aplicado en las curvas de la Figura 6.

Tabla 3. Propiedades mecánicas de los paneles MT1, MT2, MT3

Panel	Id	Carga kN	Ss MPa	Prom (Ss) MPa	Gm MPa	Prom (Em) MPa
Paja + moldura + revoco	MT1-1	26.66	0.37		403.46	
	MT1-2	27.77	0.39	0.38	411.73	157.11
	MT1-3	26.66	0.37		457.05	
Paja + moldura	MT2-1	2.75	0.11		263.22	
	MT2-2	2.87	0.12	0.12	307.05	1.81
	MT2-3	2.84	0.12		339.73	
Moldura	MT3-1	1.8	0.07		467.18	
	MT3-2	1.69	0.07	0.07	352.71	1.09
	MT3-3	1.49	0.06		235.07	

El esfuerzo cortante máximo de los prefabricados con paja, molduras de madera y mortero de revestimiento es de 0.38 MPa, mientras que su módulo de rigidez a corte es igual a 157.11 MPa. Si se verifican los resultados obtenidos para estas dos propiedades cuando los paneles no cuentan con el mortero de revestimiento, sus valores disminuyen a 0.12 MPa y 1.81 MPa respectivamente. Por lo tanto, el mortero incrementa la resistencia a corte del panel hasta un 68.42 % y su módulo de rigidez corte más del 100 %.

El esfuerzo cortante máximo de la moldura de madera es de 0.07 MPa, mientras que su módulo de rigidez a corte es 1.09 MPa. Al comparar estos resultados con los obtenidos para los paneles que no cuentan con un revestimiento, se observa que la paja aumenta el esfuerzo a corte de la moldura hasta un 41.66 % y su módulo de rigidez a corte hasta un 39.44 %. A diferencia del caso anterior, se puede ver claramente que la paja no solo trabaja como material de relleno, sino que contribuye significativamente a la resistencia del panel ante la presencia de fuerzas cortantes que pudieran estar sometidos.

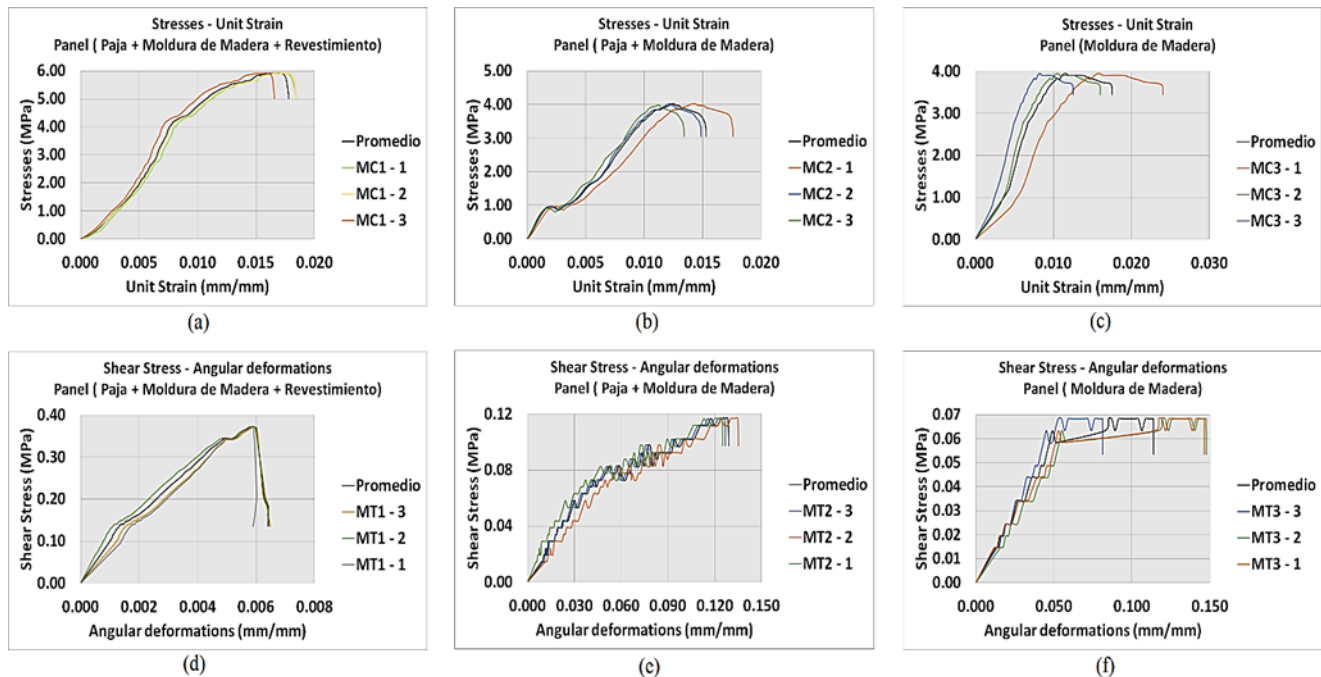


Figura 6. Diagramas esfuerzos vs deformaciones unitarias: a) Paneles (MC1), b) Paneles sin recubrimiento (MC2), c) Marcos de madera (MC3). Diagramas esfuerzos cortantes vs deformaciones angulares: d) Paneles (MT1), e) Paneles sin recubrimiento (MT2), f) Marcos de madera (MT3)

El módulo de elasticidad de un muro de mampostería con bloque es mayor en casi 8 veces que al obtenido con el panel con un revestimiento. Por lo tanto, estos paneles presentan una menor rigidez y son más deformables, garantizando una mayor disipación de energía y flexibilidad dentro de la edificación ante las acciones sísmicas. En cuanto al comportamiento a cortante del panel, se comprueba que es el revestimiento quien aumenta considerablemente los esfuerzos a cortante.

Determinadas las propiedades de los paneles con revestimiento, estas se han ingresado en el modelo computacional de la edificación analizada mediante un sistema de muros portantes. Además, para los elementos de madera entablados, vigas, columnas y cerchas se ingresaron las propiedades de la madera tipo B.

Se logra determinar que el valor mínimo para las derivas inelásticas de la edificación de 3 pisos es del 0.13 % en el sentido “Y” y el valor máximo es del 0.95 % en el sentido “X”. La NEC-SE-DS (2015) indica que el valor máximo permisible de derivas para sistemas de muros portantes como es el caso de estudio, no deberá superar el 1 % en cualquiera de los pisos, por lo tanto, los valores de derivas obtenidos están dentro del límite máximo permitido.

En la Tabla 4, se indican los resultados de la participación modal de masas para la edificación de estudio, se obtienen una masa modal acumulada superior al 90 % de la masa total de la estructura como lo indica la NEC-SE-DS (2015), en el modo 4 para la dirección “X”, en el modo 5 para la dirección “Y” y en el modo 6 para la dirección “Z”.

La edificación presenta para el modo 1 traslación en el sentido “X” del 78.33 %, mientras en el modo 2 se tiene una traslación en el sentido “Y” del 78.11 %, la rotación en los dos primeros

modos es mínima del 0.24 % y 1.24 %, respectivamente. Este comportamiento es ideal en edificaciones sismo resistentes al presentar traslación en los dos primeros modos, mientras que en el tercero debe predominar la rotación, que para este caso es del 79.23 %. El periodo de vibración fundamental de la edificación es igual a 0.21 segundos, el cual es inferior al máximo permitido de 0.27 segundos, encontrándose dentro del rango que indica la NEC-SE-DS (2015).

Tabla 4. Respuestas estructurales de vivienda de 3 pisos de altura con paneles prefabricados.

Modo	UX	UY	RZ	Sum UX	Sum UY	Sum RZ
1	78.33 %	0.08 %	0.24 %	78.33 %	0.08 %	0.24 %
2	0.06 %	78.11 %	1.24 %	78.40 %	78.19 %	1.49 %
3	0.15 %	1.23 %	79.23 %	78.55 %	79.43 %	80.71 %
4	13.51 %	0.00 %	0.20 %	92.06 %	79.43 %	80.91 %
5	0.05 %	13.71 %	2.28 %	92.10 %	93.14 %	83.19 %
6	0.43 %	2.67 %	11.57 %	92.53 %	95.81 %	94.76 %
7	4.86 %	0.02 %	0.59 %	97.40 %	95.83 %	95.35 %
8	0.18 %	0.02 %	0.08 %	97.57 %	95.86 %	95.43 %
9	0.00 %	0.40 %	0.00 %	97.57 %	96.26 %	95.43 %

4. CONCLUSIONES

Las pacas de paja de arroz pueden ser utilizadas en la construcción de viviendas, al contar mayormente con un contenido de humedad menor al 20 %, como lo establece el Código Residencial Internacional, IRC (2018). Esta propiedad es un parámetro de control fundamental, puesto que la paja al superar el 20 % de humedad tiende a descomponerse dentro de la edificación afectando así su vida útil.

De las 24 pacas elaboradas con paja de arroz, 23 presentan densidades aparentes superiores a 80 kg/m³ y tan solo una presenta una densidad inferior, su valor promedio es igual a 84 kg/m³. Según Teslik (2021) con este valor obtenido, las pacas elaboradas con paja de arroz garantizan excelentes propiedades térmicas, acústicas y alta resistencia al fuego en las edificaciones.

La paja en el panel sin recubrimiento aumenta la resistencia a compresión de la moldura de madera hasta un 1.37 % es decir 0.05 MPa, si bien es cierto la paja aporta una resistencia a compresión insignificante, es la moldura de madera quien absorbe la mayor sollicitación de cargar a compresión en un 98.63 %. Sin embargo, después del fallo del panel, se evidencia que la paja tiene la propiedad de reestablecer la forma del mismo después de retirar la carga durante el ensayo. Esta característica permitiría a las edificaciones construidas con estos paneles tener una mayor estabilidad después de un sismo gracias al uso de la paja, hasta el punto de impedir el colapso de las edificaciones y evitar las pérdidas de vidas.

La paja disminuye el valor del módulo de elasticidad de la moldura de madera hasta un 13.74 % es decir 48.32 MPa, aumentando su flexibilidad. Este desecho agroindustrial no aumenta la resistencia a compresión del marco, sin embargo, debido a su incorporación se evidencia un aporte significativo en su resistencia a corte de hasta 41.67 % que corresponde a 0.05 MPa, lo cual es beneficioso para su comportamiento sísmico. En cuanto al módulo de rigidez a corte la paja aumenta este valor hasta un 39.78 % es decir 0.72 MPa. La presencia de la paja en la moldura de madera aumenta sus sollicitaciones ante fuerzas cortantes, evidenciándose que su función no es solamente trabajar como material de relleno.

El mortero de revestimiento aumenta la resistencia a compresión axial y a corte del mismo hasta un 32.03 % (1.72 MPa) y un 68.42 % (0.26 MPa), respectivamente. Respecto al valor de su módulo de elasticidad, se produce un incremento de más del 100 % en comparación al valor obtenido del panel sin revestimiento, mientras que el módulo de rigidez a corte puede incrementarse hasta un 28.47 % (120.75 MPa). Por lo tanto, el mortero de revestimiento influye directamente en la rigidez del panel.

Las propiedades mecánicas de los paneles compuestos por pacas de paja, molduras de madera y un revestimiento, obtenidas de forma experimental mediante la ejecución de ensayos destructivos son las siguientes: resistencia a compresión axial y corte de 5.37 MPa y 0.28 MPa respectivamente, módulo de elasticidad de 424.08 MPa y rigidez a corte de 157.11 MPa.

Al realizar la evaluación estructural de los paneles compuestos por pacas de paja, molduras de madera y un revestimiento, utilizados en una edificación de 3 pisos de altura, se obtuvieron derivas de piso inferiores al 1 % en el sentido “X” y “Y”, una masa modal acumulada superior al 90 % de la masa total de la estructura, un periodo de vibración fundamental igual a 0.21 segundos que es inferior al valor admisible determinado con los lineamientos de la norma ecuatoriana. Por lo tanto, el uso de este tipo de paneles es seguro y permite la construcción

edificaciones sismo resistentes de mediana altura, al presentar un adecuado comportamiento estructural y que cumplir con los requisitos establecidos en la norma NEC – SE – DS (2015).

REFERENCIAS

- ASTM C1314-14. (2016). Compressive Strength of Masonry Prisms. *American Society for Testing and Materials*.
- ASTM C469. (2009). Static Modulus of Elasticity and Poisson's of Concrete in Compression. *American Society for Testing and Materials*.
- ASTM E519-07. (2010). Diagonal Tension (Shear) in Masonry y Assemblages. *American Society for Testing and Materials*.
- Augustynska, A. (2020). Opportunities and threats for natural building using straw bale technology. *Budownictwo i Architektura*, 19(1), 29-37. <https://doi.org/10.35784/bud-arch.739>
- Cascone, S., Rapisarda, R., & Cascone, D. (2019). Physical properties of straw bales as a construction material: A review. *Sustainability*, 11(12), 1-19. <https://doi.org/10.3390/su11123388>
- Chen Z., Sun, H., & Cao B. (2021). Experimental study on seismic behavior of cold-formed steel shear wall with reinforced plastered straw-bale sheathing. *Thin-walled structures*, 169(9), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108303>
- Cornaro, C., Zanella, V., Robazza, P., Belloni, E., & Buratti, C. (2019). An innovative straw bale wall package for sustainable buildings: experimental characterization, energy and environmental performance assessment. *Energy and buildings*, 208(1), 1-39. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109636>
- Díaz, C., Pérez, M., & Mancilla J. (2020). Physical-thermal straw properties advantages in the design of a sustainable panel-type construction system to be used as an architectural dividing element. *International week of science, technology and innovation*, 1597(1), 19-22. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1587/1/012032>
- Dimova, V., & Georgiev, M. (2021). Optimizing the thickness of a straw outer wall of a building for sows in a view to achieving cost-effective heat insulation. *Agricultural science and technology* 13(2), 167-175. <https://doi.org/10.15547/ast.2021.02.028>
- Dukarska, D., Pędzik, M., Rogozińska, W., Rogoziński, T., & Czarnecki, R. (2021). Characteristics of straw particles of selected grain species purposed for the production of lignocellulose particleboard. *Particulate science and technology*, 39(2), 213-222. <https://doi.org/10.1080/02726351.2019.1686096>
- Echeverría, M. (2019). *Caracterización del adobe reforzado con fibras naturales y artificiales para la recuperación de construcciones tradicionales en la comuna de Zuleta* [Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio universitario Universidad Central del Ecuador. <https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/a333b798-fc02-4973-ad86-ee6aaec87485>

- Espinoza, P., Proaño, D., Barrera, L., & Arpi, E. (2024). Catálogo de madera estructural Ecuador. *Diseño-Arquitectura-Arte*, 1(1), 1-59. <https://doi.org/10.33324/ceuzuay.325>
- García, M. (2022). *Validación analítica de resultados experimentales de vibración ambiental de casas realizadas con fardos de paja y mochetas de madera* [Tesis de maestría, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. Repositorio universitario Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/31121>
- Hasan, F., Hornováth, P., Bak, M., Le, D., Mucsi, Z., & Alpár, T. (2021). Rice straw and energy reed fibers reinforced phenol formaldehyde resin polymeric biocomposites. *Cellulose*, 28(1), 7859-7875. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04029-9>
- Hernández, M., Martínez, S., & Sánchez, J. (2020). Materiales alternativos como oportunidad de reducción de impactos ambientales en el sector construcción. *Tecnología en marcha*, 34(2), 3-10. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4831>
- Hon, C., & Kraniotis, D. (2020). A review of material properties and performance of straw bale as building material. *Construction and building materials*, 259(1), 120385-120398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120385>
- Huixiang, P., Walker, P., Maskell, D., & Jones, B. (2021). Structural characteristics of load bearing straw bale walls. *Construction and building materials*, 287(1), 122911-122918. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122911>
- Hussein, Z., Ashour, T., Khalil, M., Bahnasawy, A., Ali, S., Hollands, J., & Korjenic, A. (2019). Rice straw and flax fiber particleboards as a product of agricultural waste: an evaluation of technical properties. *Applied sciences*, 9(18), 1-20. <https://doi.org/10.3390/app9183878>
- IRC. (2018). International Residential Code. *Appendix S Strawbale Construction*. <https://codes.iccsafe.org/content/IRC2018/appendix-s-strawbale-construction>
- Lehner, P., Hornakova, M., Vlcek, P., & Teslik J. (2021). Experimental investigation of two test setups on straw bales used as load-bearing elements of buildings. *Buildings*, 11(11), 1-10. <https://doi.org/10.3390/buildings11110539>
- Lima, L., Trindade, E., Alencar, L., Alencar, M., & Silva, L. (2020). Sustainability in the construction industry: a systematic review of the literature. *Journal of cleaner production*, 289(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125730>
- Makovicka, L., Markova, I., Jochim S., & Bares J. (2021). Experimental study of straw-based eco-panel using a small ignition initiator. *Polymers*, 13(8), 1-12. <https://doi.org/10.3390/polym13081344>
- Marquês, B., Tadeu, A., Almeida, J., António, J., & Brito, J. (2019). Characterization of sustainable building walls made from rice straw bales. *Building Engineering*, 28(1), 1-30. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101041>
- Mihmic, A., & Salihbegovic, A. (2021). Aspects of reversibility and energy efficiency of prefabricated straw structures – guidelines for sustainable design of architectural Interventions of 21st century. *Materials science and engineering*, 1203(2), 1-9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1203/2/022085>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería MAGAP. (2022). *Sistema de información pública agropecuaria*., Quito, Ecuador: Boletín Situacional, Reporte Técnico. <https://sipa.agricultura.gob.ec/>
- Ministerio del Ambiente y Agua (2020). *Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos municipales*., Quito, Ecuador: Boletín Situacional, Reporte Técnico. <https://www.ambiente.gob.ec/>
- MXN-C-464-ONNCCE. (2010). Determinación de la resistencia a compresión diagonal y módulo de cortante de muretes. *Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C*, 1-23.
- Mutani, G., Azzolino, C., Macrí, M., & Mancuso, S. (2020). A good compromise between environmental sustainability and energy-economic savings. *Applied Sciences*, 10(8), 2858. <https://doi.org/10.3390/app10082858>
- NEC-SE-MD. (2015). Estructuras de Madera. *Norma Ecuatoriana de la Construcción*, 1-85.
- NEC-SE-DS. (2015). Peligro Sísmico - Diseño Sismo Resistente. *Norma Ecuatoriana de la Construcción*, 1-48.
- NEC-SE-MP. (2015). Mampostería Estructural. *Norma Ecuatoriana de la Construcción*, 1-64.
- Njike, M., Oyawa, W., & Aboudha, S. (2020). Structural performance of straw block assemblies under compression load. *The open construction y building technology journal*, 14(1), 350-357. <https://doi.org/10.2174/1874836802014010350>
- NTE INEN 2518. (2010). Morteros para unidades de mampostería requisitos. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 1-30.
- NTE INEN 3153. (2020). Muretes de mampostería elaborados en laboratorio. Determinación de la resistencia a la compresión. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 1-32.
- NTE INEN 488. (2009). Cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 1-19.
- Pachala, J., & Rosero, P. (2016). *Sistema constructivo de casas unifamiliares con muros de paja portantes* [Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio universitario Universidad Central del Ecuador. <https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/f5ac42bf-4fc7-4c28-86dc-9ad48a348915>
- Pavia, S., & Brennan, O. (2018). *Portland Cement – Lime mortars for conservation*., Dublin, Ireland: Springer International Publishing AG. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-91606-4_10
- Ramos, H., & Viera, L. (2023). Fabricación de morteros aligerados con pelita y cal aplicados en paneles con

- matriz de residuos de paja de arroz. *Hábitat sustentable*, 13(2), 76-91. <https://doi.org/10.22320/07190700.2023.13.02.06>
- Sabapathy, K., & Gedypudi, S. (2018). Straw bale based constructions: measurement of effective thermal transport properties. *Construction and building materials*, 198(1), 182-194. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.256>
- Santamaría, N., & Sagñay, A. (2024). *Propuesta de prototipo de bioconstrucción con el uso de fibras vegetales de cebada del cantón Colta* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Chimborazo]. Repositorio universitario Universidad Nacional de Chimborazo. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/14179>
- Tachaudomdach, S., & Hempao, S. (2022). Investigation of compression strength and heat absorption of native rice straw bricks for environmentally friendly construction. *Sustainability*, 14(19), 1-15. <https://doi.org/10.3390/su141912229>
- Teslik, J. (2021). Analysis of the fire properties of blown insulation from crushed straw in the buildings. *Materials*, 14(15), 1-12. <https://doi.org/10.3390/ma14154336>
- Tlajji, G., Biwole, P., Oudboukhitine, S., & Pennec, F. (2022). A mini-review on straw bale construction. *Energies*, 15(21), 1-8. <https://doi.org/10.3390/en15217859>
- Viel, M., Collet, F., & Lanos, C. (2019). Development and characterization of thermal insulation materials from renewable resources. *Construction and building materials*, 214(1), 685-697. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.139>
- Viera, L., Caiza, P., & García, A. (2023). Evaluación del modelo estructural de casas construidas con fardos de paja y mochetas de madera en la región andina central del Ecuador. *Revista Ingenio*, 7(1), 64-72. <https://doi.org/10.29166/ingenio.v7i1.5591>
- Viera, L., Pacheco, G., & Vásquez, J. (2023). Structural modeling of straw bale loadbearing wall. *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.*, 3(1), 657-666. <https://doi.org/10.18502/epoch.v3i1.144478>
- Viera, L., & Ramos, H. (2022). Propuesta de máquina enfardadora para realizar material de construcción a partir de desecho agroindustrial. *Eidos*, 14(20), 45-54. <https://revistas.ute.edu.ec/index.php/eidos/article/view/1035>
- Viera, P., Aguirre, D., & Monzó, J. (2020). Determinación de las características del fardo de paja de trigo, como desecho agroindustrial para su aprovechamiento como material de construcción. *Ingeniería Universidad de Carabobo*, 27(3), 304-318. <https://doi.org/10.54139/revinguc.v27i3.150>
- Walker, P., Thomson, A., & Maskell, D. (2020). *Straw bale construction.*, Bath, Inglaterra: University of Bath, United Kingdom. <https://researchportal.bath.ac.uk/en/publications/straw-bale-construction-2>
- Yin, X., Lawrence, M., & Maskell, D. (2018). Straw bale construction in northern China – Analysis of existing practices and recommendations for future development. *Building Engineering*, 18(1), 408-417. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.04.009>
- Yin, Q., Yu, M., Ma, X., Liu, Y., & Yin, X. (2023). The role of materials in energy-efficient buildings: current perspectives and future trends. *Energies*, 16(8), 1-24. <https://doi.org/10.3390/en16083480>
- Yin, X., Dong, Q., Zhou, S., Yu, J., Huang, L., & Sun, C. (2020). Energy-saving potential of applying prefabricated straw bale construction (PSBC) in domestic buildings in northern China. *Sustainability*, 12(8), 1-18. <https://doi.org/10.3390/su12083464>
- Zhang, D., Zhao, J., Wang, D., Xu, C., Zhai, M., & Ma, X. (2018). Comparative study on the properties of three hydraulic lime mortar systems: Natural hydraulic lime mortar, cement-aerial lime-based mortar and slag-aerial lime-based mortar. *Construction and Building Materials*, 186(1), 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.053>
- Zhang, X., Zhang, E., & Li, C. (2021). Study on axial compression mechanical behavior of cold-formed thin-walled C-shaped steel composite wall sheathed with straw board on both sides. *Structures*, 33(1), 3746-3756. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.071>

BIOGRAFÍAS



Henry, Ramos, Ingeniero Civil graduado en la Universidad Central del Ecuador, becario por excelencia académica al obtener uno de los más altos puntajes en su rendimiento por 8 semestres consecutivos, ayudante de cátedra por concurso de méritos y oposición en la materia de Resistencia de Materiales. Graduado del programa de Maestría en Investigación en Ingeniería Civil mención en Estructuras de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Consultor estructural con amplia experiencia en el diseño y construcción de edificaciones, se desempeña como docente en la Universidad Central del Ecuador.



Luisa, Viera, Ingeniera civil, segundo mejor promedio de su promoción. Magister en Estructuras Sismo-resistentes. Doctora en Ingeniería de la Construcción por la Universitat Politècnica de València. Docente titular Agregado 2 de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Central del

Ecuador.