

ENTREPISO SEMI-PREFABRICADO DE PAJARCILLA. DESARROLLO DE PIEZAS MODULARES Y ANÁLISIS DEL SISTEMA

Alan Sosa Contreras¹, Luis Fernando Guerrero Baca², Tonatiuh Magaña Guzmán³

¹Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México, alansosac15@gmail.com

²Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco (UAM), México, luisfg1960@yahoo.es

³Universidad Autónoma de Baja California (UABC), México, tonatiuh.magana@uabc.edu.mx

Palabras clave: pruebas mecánicas, normativa mexicana, método de evaluación

Resumen

Con la prefabricación se puede tener un mayor control en el desempeño mecánico de los sistemas constructivos, además de reducir el tiempo de ejecución y el desgaste energético en los trabajadores. En búsqueda de estos beneficios se plantea la prefabricación del entrepiso de pajarcilla, un sistema utilizado en la bioconstrucción en México. Previamente se evaluó la pajarcilla como material constructivo, y ahora se presenta la segunda parte del método de evaluación. Los objetivos de este trabajo son: detallar el diseño del entrepiso semi-prefabricado y sus componentes, establecer la resistencia a flexión de las piezas modulares, determinar si se cumple o no con las solicitudes de carga para entrepisos que establece la normativa mexicana y definir los alcances y limitaciones del propio método a partir del análisis de los resultados. La mezcla utilizada se definió en la evaluación de la pajarcilla, mientras que el diseño de las piezas modulares y por tanto del sistema se realizó a partir de criterios constructivos, consideraciones para elementos horizontales de tierra y diversos casos análogos. Ante la falta de registros sobre la resistencia de la pajarcilla en entrepiso, se realizaron pruebas mecánicas a las piezas modulares. Éstas se analizaron a partir de la norma NMX-C-463-, que evalúa las bovedillas empleadas en sistemas convencionales de edificación. Luego se propuso un método de evaluación-validación de las piezas modulares y, por tanto, del sistema de entrepiso. Todas las piezas resistieron por encima de los 125 kgf solicitados en la normativa, indiferentemente del tipo de tierra, pero esto no fue igual cuando éstas se evaluaban a partir del desplazamiento y no de la carga. Una vez evaluadas las piezas, se probaron por separado los refuerzos interiores de madera, concluyendo que además de la resistencia mecánica de la pajarcilla, ésta absorbe la deformación, lo que retarda la fractura del refuerzo y que, incluso cuando éste falló, la pieza continuaba mostrando resistencia. A partir de la correlación de los resultados de las pruebas y lo solicitado para pisos ligeros de madera en la norma mexicana, se planteó que una vez cumplido lo establecido en la prueba de las piezas modulares, éstas pueden ser utilizadas en el entrepiso.

1 ORIGEN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Problemática inicial

El entrepiso de pajarcilla ha sido utilizado en diversos proyectos de bioconstrucción en México (Caballero Cervantes; Guerrero Baca, 2021), su aplicación ha sido difundida gracias al Proyecto San Isidro, ubicado en Taxco, Tlaxcala, donde se imparten cursos de diversas técnicas de construcción con materiales naturales. A partir de la observación del proceso constructivo y de las entrevistas realizadas a la arquitecta Alejandra Caballero y al maestro Humberto Flores (Caballero Cervantes et al., 2022) se detectó que, si bien este sistema había funcionado como solución a las construcciones de dos niveles en bioconstrucción, se requería de una demanda importante de energía por parte del trabajador y recursos materiales.

En primera instancia, por la posición que deben adoptar los trabajadores para compactar la mezcla in situ (figura 1) este proceso se vuelve tedioso y pesado. Además, como la pajarcilla únicamente funcionaría como aislante térmico y acústico (Volhard, 2016a), se necesita colocar una capa superior de duela de madera para poder transitar por el entrepiso. A la madera de la duela superior, se le debe agregar la utilizada en las dos cimbras (figura 1), la primera que

se coloca en la parte inferior y que debe abarcar todo el claro de entreviga y la cimbra móvil, que se va recorriendo en la parte superior, conforme se rellena y compacta la mezcla, por lo que puede constar de 3 o 4 tablas de 20cm de ancho.



Figura 1. Proceso constructivo del entreciso de pajarilla tradicional

1.2 Prefabricación como solución

Se postuló que la prefabricación de piezas en serie similares a las bovedillas convencionales pero hechas con pajarilla, permitiría a los trabajadores realizar la mayor parte del proceso a nivel del suelo, agilizando los tiempos. La fabricación y secado de las piezas se pueden hacer paralelamente al levantamiento de muros y colocación de vigas de madera. Además, se buscaría una mezcla más resistente, que permitiera omitir el enduelado de madera en la parte superior o sustituirlo por una capa de compresión similar a las piezas prefabricadas.

Aunque la prefabricación en arquitectura se había vinculado a materiales industrializados, recientemente la construcción con tierra ha adoptado componentes prefabricados para mejorar sus características y garantizar su calidad (Casares Ruiz; Gustamante Montoro, s/f). La prefabricación en tierra no es nueva; los adobes pueden considerarse como tal (Daneels, 2020). Entre las ventajas están la reducción de humedad, un proceso más limpio, control de calidad, y menores costes de mano de obra y tiempos de ejecución (Volhard, 2016b) (Volhard, 2016a). Sin embargo, en algunos se encarece debido al transporte de las piezas, a su peso y grandes dimensiones (Casares Ruiz, Gustamante Montoro, s/f).

Ahora bien, para optimizar los procesos de prefabricación local es necesario conocer las propiedades mecánicas del material (Casares Ruiz; Gustamante Montoro, s/f). Aunque las mezclas de tierra y paja han sido estudiadas con diversos objetivos (Acevedo Oliva et al., 2019; Labat et al., 2016), siempre se tienen variables que impactan en los resultados presentados, desde la técnica constructiva, el tipo de tierra, la fibra utilizada, así como las cantidades y los métodos de prueba realizados. Por lo anterior, es recomendable la ejecución de pruebas mecánicas durante el desarrollo de la propuesta.

1.3 Limitación en cuanto a métodos de prueba y validación

El uso de tierra como material de construcción se enfrenta a problemas de regulación en cuanto a su aplicación y métodos de prueba. En México, al no contemplarse a la tierra como material de construcción convencional, tampoco existen métodos de evaluación, ensayos específicos, parámetros o criterios a evaluar, lo que restringe su aplicación de manera amplia y por sectores vinculados a la edificación masiva.

Ante esta limitación normativa, se optó por tomar como referencia algunos principios de evaluación utilizados en desarrollos tecnológicos similares, ya sean prefabricados de tierra o sistemas para cubiertas a base de materiales naturales. A partir de estos, se detectaron distintos métodos de evaluación, destacando las pruebas a compresión y flexión, por ser los esfuerzos a los que está sometido un sistema de entrepiso o cubierta. Así, se filtró del catálogo de normas (ONNCCE, 2023), aquellas que evaluarán materiales ante estos esfuerzos. La revisión de casos análogos también aportó en el diseño de las piezas modulares y, por tanto, del sistema. Algunos principios de diseño y evaluación fueron tomados a partir de casos análogos como el adobillo (Dávila Urrejola; Contreras Silva, 2022), el *machimbloque* (Sánchez Mora, 1983), los *hourdiblocks* (Auroville Earth Institute, s/f), el *sugarcrete* (Gutierrez et al., 2022) y el *domotej* (Castañeda Nolasco, 2022).

2 OBJETIVO

A partir de estos antecedentes, se propone desarrollar un entrepiso semi-prefabricado de pajarcilla, que cumpla con las demandas estructurales establecidas en la normativa mexicana. En este trabajo se presenta la segunda etapa experimental, por lo que los objetivos específicos que se abordan en este documento son: presentar el diseño del entrepiso semi-prefabricado y sus componentes, establecer la resistencia a flexión de las piezas modulares, determinar si se cumple o no con las solicitudes de carga para entrepisos que establece la normativa mexicana y definir los alcances y limitaciones del propio método a partir del análisis de los resultados.

3 CONSIDERACIONES GENERALES

3.1 Piezas modulares o prefabricados de tierra

Al proponer piezas refabricadas no se plantea separar espacialmente los procesos, esto quiere decir que la manufactura de las piezas se pueda realizar dentro de la misma obra o en un espacio cercano a ella, a fin de evitar los sobrecostos e impacto ambiental del transporte. Además, como uno de los objetivos principales al proponer la prefabricación era reducir el desgaste energético de los trabajadores, se buscó tener piezas que fueran fácilmente maniobrables por lo que el tamaño y el peso jugarían un papel importante en el diseño.

Aunque en la actualidad se pueden encontrar diferentes productos prefabricados de tierra aligerada o pajarcilla, en la mayoría de los casos se emplean sólo como relleno de aislante térmico, y suelen recomendar no utilizar estos elementos en espacios que estén sometidos a cargas vivas, aun cuando tengan algún refuerzo en su interior (Volhard, 2016c).

Como cada sistema constructivo resuelve sus dificultades o limitaciones técnicas a partir del diseño particular, no es lógico adoptar o adaptar las soluciones formales de los materiales industrializados para las técnicas de construcción con tierra (Casares Ruiz; Gustamante Montoro, s/f). Con el análisis histórico de las distintas maneras en las que se ha utilizado la tierra en sistemas horizontales, la morfología de las piezas surgió de algunos conceptos del diseño por forma ante el tipo de esfuerzos a los que estarán sometidas.

3.2 Entrepisos y cubiertas en la construcción con tierra

Entre los factores que aumentan la vulnerabilidad sísmica de las construcciones con tierra, la mayoría están relacionados con los elementos horizontales. Por ello, se considera que las edificaciones de tierra de dos niveles o más, presentan mayores riesgos. Estos factores incluyen: el uso de materiales no compatibles, entrepisos pesados, ausencia de diafragmas, apoyo y anclaje inadecuado sobre los muros, entrepisos muy flexibles y una estructuración de cubierta deficiente (Yamín Lacouture et al., 2007).

Cuando se utiliza la tierra para cubiertas, suelen resultar muy pesadas (300-500 m²), por lo que no se recomienda en zonas sísmicas (Habitat, 1992). El peso de las partes de la

construcción agrava la fuerza sísmica por lo que se recomienda el empleo de elementos ligeros (Guerrero Baca, 2007). Aunque existen sistemas tradicionales en los que la presión de la cubierta es necesaria para mantener el trabajo conjunto de los muros, en regiones altamente sísmicas esta masa puede aplastarlos y hacerlos colapsar, como resultado de aceleraciones oscilatorias, y peor aún, de las trepidatorias (Jorquera Silva, 2013).

Para favorecer el trabajo en conjunto de los muros, se suele colocar una cadena o solera perimetral sobre el muro, donde recaerá el techo o entrepiso. Esta cadena, de madera o tierra amasada mezclada con fibras largas, distribuye las cargas de manera uniforme (Guerrero Baca, 2019). La viga collar es eficaz para estabilizar estructuras de tierra y debe recorrer toda la parte superior de los muros, especialmente en las esquinas. Las cadenas de madera contribuyen al comportamiento postelástico del edificio (Michiels; Fonseca Ferreira, 2013) por su flexibilidad, ligereza y porque sus capacidades estructurales son más cercanas a las de la tierra, que las que se realizan, por ejemplo, en concreto armado.

Los elementos horizontales como cubiertas y entrepisos actúan como diafragmas, transmitiendo las cargas a los elementos verticales para estabilizar la estructura (Cevallos Salas, 2015). En construcción con tierra, es preferible que estos diafragmas sean flexibles, para evitar la sobrecarga acumulada sobre los muros durante movimientos sísmicos. Los entrepisos de madera, gracias a su flexibilidad, limitan la transferencia excesiva de carga a los muros, reduciendo el riesgo de fallo por cortante (Michiels; Fonseca Ferreira, 2013).

Además de buscar opciones más ligeras en cubiertas y entrepisos, que a su vez tengan la resistencia suficiente para ligar los muros y poder transmitir los esfuerzos, se debe evitar la concentración de cargas en los muros para evitar el efecto de péndulo invertido (Vargas Neumann, 2013).

4 MÉTODO DE EVALUACIÓN

Para validar el sistema de entrepiso de pajarcilla, se propone comenzar desde la caracterización de la tierra (1), pasando por, la evaluación del material a flexión (2) y a compresión (3), lo que dará paso a la determinación de la mezcla a utilizar y probar en las piezas modulares (4) y la capa de compresión, para la validación integral del sistema (5).

Al analizar primero el material, se puede comprender la influencia mecánica de los distintos agregados de la pajarcilla y modificar sus concentraciones conforme los resultados que se van obteniendo. Sosa Contreras (2023) presento, en formato cartel, estos resultados en el SIACOT 21.

Para este trabajo se presentan los apartados 4 y 5 del método de evaluación propuesto. Dentro de las ventajas que se tienen, es que, al ser un prefabricado, la evaluación de las piezas modulares se realiza de la manera más parecida a los esfuerzos a los que estarán sometidas en su disposición final, estrategia distinta a lo que sucede con otras técnicas de construcción con tierra, donde se requiere probar secciones grandes y pesadas, ya que la respuesta mecánica recae más en su trabajo en conjunto que en la resistencia del material.

4.1 Etapas previas

Con las pruebas a flexión y compresión realizadas a la mezcla, se establecieron sus características mecánicas. La determinación de la resistencia de la pajarcilla en probetas, parte del supuesto de que, existe mayor probabilidad de que al utilizar este material en la pieza modular, tendrá un comportamiento parecido al de las bovedillas evaluadas en la norma mexicana. La mezcla con mayor resistencia a flexión y, por lo tanto, la seleccionada para las

piezas modulares poseía las siguientes características: tierra arcillosa (29-45% de arcilla), densidad alta (900-1000 kg/m³)¹, compactado manual, longitud de fibras (entre 10 y 15cm).

4.2 Piezas modulares

La técnica para las piezas modulares se basa en sistemas de entramados que trabajan con una estructura leñosa, generalmente madera, y requieren refuerzos adicionales en entresijos y cubiertas (Caballero Cervantes; Guerrero Baca, 2021). En los entresijos de pajarcilla tradicional, estos refuerzos se colocan a cada 15cm de forma perpendicular y sobre un riel de madera clavado en la viga cada 15cm y se ahogan en la mezcla de pajarcilla, con un grosor de entresijo de 8cm a 15cm (figura 1) (Caballero Cervantes, s/f). Estos criterios se usaron para las características y medidas de las piezas modulares.

Como se explicó, el diseño por forma y el trabajo de esta técnica en conjunto con la estructura de madera fue clave para la propuesta. Por lo tanto, para la evaluación de las piezas modulares, es necesario adaptar un soporte que equivalga a las vigas del entresijo, y que esté unido por algún elemento transversal, como lo puede ser una varilla roscada con tuercas. De este modo se evita que, ante la aplicación de la carga, las vigas de madera se separen y además, se estaría representando el empuje que generan las piezas de los costados sobre estas, anulando de algún modo, el riesgo de volteo o separación.

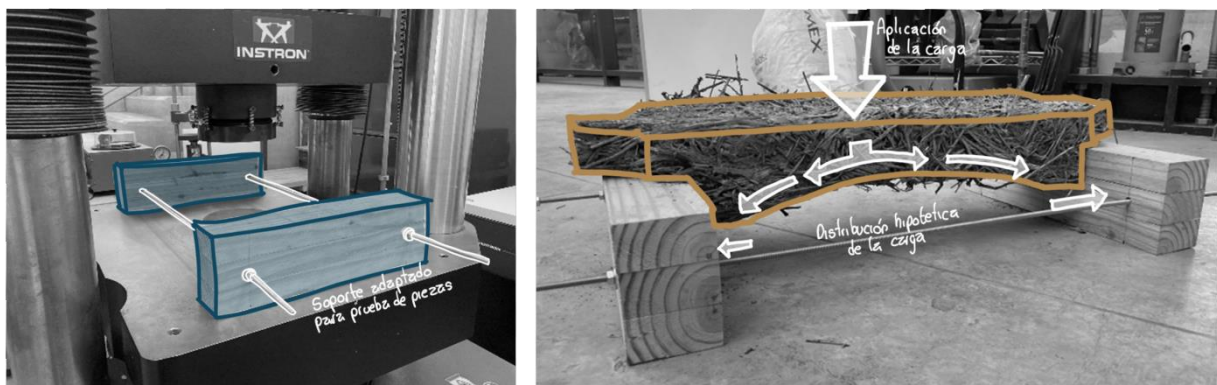


Figura 2. Soporte para evaluación de piezas modulares

Una vez definida la mezcla y el diseño modular, se fabricaron 3 piezas para un primer muestreo, por ser el número mínimo de piezas a evaluar de acuerdo con la norma de referencia. Por su similitud con el sistema de vigueta y bovedilla, se tomó como referencia la evaluación de bovedilla de poliestireno a partir de la NMX-C-463 (2009).

Aunque la NMX-C-463 indica que se debe aplicar 125kgf en 1 minuto, al ser la primera vez que se evaluaban las piezas modulares y no conocer la respuesta mecánica, se decidió realizar la evaluación de forma escalonada hasta cumplir con lo establecido en la norma. En principio se retomó la aplicación de carga concentrada al centro del claro usado en las probetas, con un desplazamiento constante de 5mm/min, hasta llegar a aplicar la carga solicitada por la norma o la ruptura del elemento modular. Posteriormente, se repitió la evaluación por desplazamiento, esta vez utilizando 3 tipos de tierra distinta. Además, con esa misma variable se realizaron las evaluaciones por carga, en primera instancia aplicando los 125kgf en 2 minutos y posteriormente en 1min, realizando así el procedimiento tal cual lo indica la norma. En total se realizaron 21 pruebas.

4.3 Análisis del sistema

Así como cuando se evalúa un adobe, su resistencia como pieza no es escalable al de la resistencia de un muro completo, se haría necesario estudiar y evaluar el entresijo

¹ Fe de erratas, en el cartel presentado por Sosa Contreras (2023) en el SIACOT 21 la unidad de medida de la densidad debe entenderse como kg/m³ y no kg/cm²

integralmente. Sin embargo, no existe un método específico para evaluar experimentalmente un entrepiso, así como la norma NMX-C-406 (2019) evalúa los elementos por separado, las normas técnicas complementarias (NTC) indican que, en caso de no contar con evidencia suficiente, sea teórica o experimental, para considerar que la estructura satisface la seguridad estructural, se deberán realizar pruebas de carga, sobre prototipos, o modelos que reproduzcan las condiciones reales.

Esto puede realizarse usando algún software de simulación alimentado por los datos obtenidos en las propias pruebas, por correlación de los resultados y lo solicitado en las normas de cada elemento del sistema o, en su defecto, realizar pruebas empíricas o de campo, como las observadas en los casos análogos construyendo un 1m² de la propuesta e ir subiendo personas hasta alcanzar la carga establecida en las NTC (2017). Para cualquiera de los métodos, es necesario calcular la combinación de carga de acuerdo con el apartado de pisos ligeros de madera de las NTC.

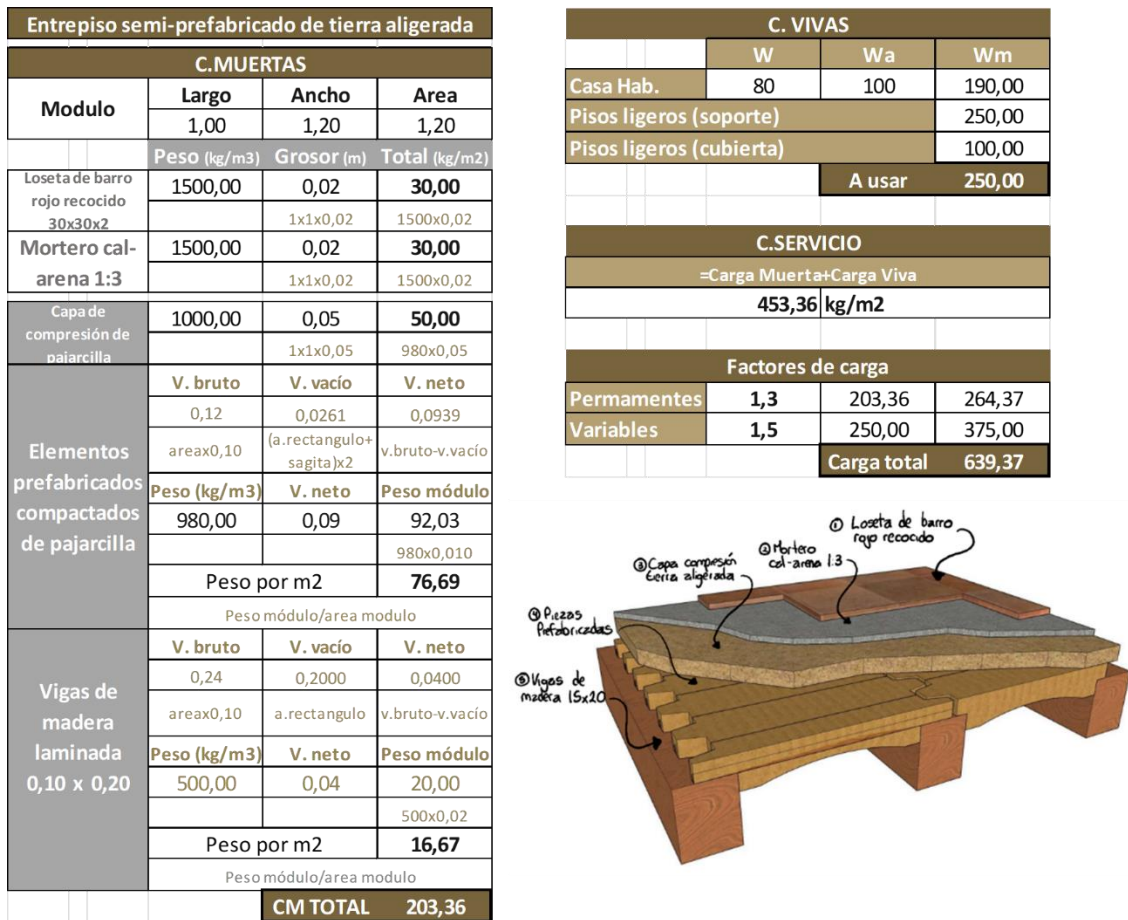


Figura 3. Calculo de combinación de cargas a partir de (NTC, 2017)

5 RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Diseño de pieza y molde

Además de los criterios de diseño antes mencionados, se encontró que, aunque la sección de las vigas utilizadas en el entrepiso de pajarilla tradicional son de 10x20cm, existen casos donde esta sección llega a ser de hasta 15x20cm, lo que repercute en las medidas de las piezas modulares. Sin embargo, el diseño de la pieza permite adaptar las medidas de la pestaña de apoyo a las medidas de las vigas de acuerdo con cada proyecto.

Se buscó que las piezas modulares y el refuerzo interior se recargaran directamente en la parte superior de la viga, para reducir el riesgo de fallo por cortante. Para esto se optó por

contrapear las piezas modulares, propiciando una mayor superficie de apoyo en ambos extremos, ya que, si se colocaban alineadas, el apoyo sería, como máximo, de la mitad del ancho de la viga. Las medidas de las piezas, así como el peso aproximado de las mismas se presenta a continuación.

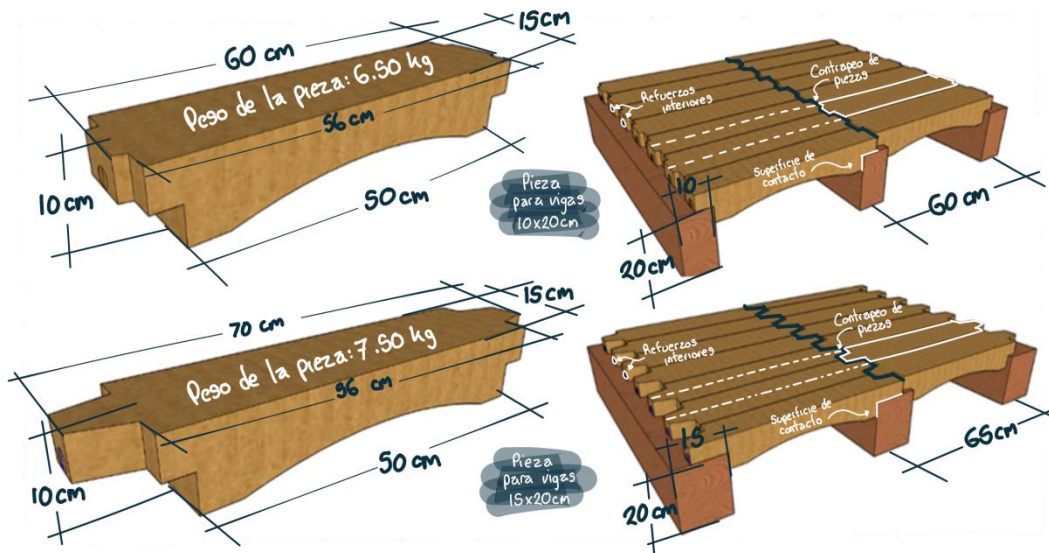


Figura 3. Distintos tamaños de piezas y su disposición sobre las vigas de madera

5.2 Evaluación por desplazamiento

Inicialmente se evaluaron 3 piezas utilizando la mezcla mencionada en el apartado 4.1. Tras el análisis de los datos obtenidos, se estableció tomar como válida la carga resistida a los 15mm de desplazamiento, en concordancia con el criterio establecido en las probetas donde se tomó el equivalente a 3% y retomando la NMX-C-405-ONNCCE-2014, que al evaluar paneles para uso en losas de entepiso establece que la flecha sufrida en las piezas no debe ser mayor a L/360, tomando L como el claro mayor. En este caso, al tener una separación entre apoyos de 50cm más 5cm de ambos apoyos, la flecha no tendrá que superar los 15mm. Aunque la forma de evaluación no es exactamente la normada, si se consiguió resistir los 125kgf que solicita la norma NMX-C-463 (2009).

Tabla 1 Resultados de muestreo en prueba por desplazamiento

| Código | Piezas modulares | | |
|------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| | BOV-Pajarcilla 1 | BOV-Pajarcilla 2 | BOV-Pajarcilla 3 |
| Densidad | 946,31 | 1038,68 | 942,43 |
| Des. Es Densidad | 54,48 | | |
| Densidad promedio kg/m3 | 975,807 | | |
| Desplazamiento a 125kgf de carga | 9,506 | 7,210 | 8,629 |
| Carga resistida a los 15mm (kgf) | 144,00 | 138,00 | 156,00 |
| Des. Es Carga resistida a 15mm | 9,17 | | |
| Promedio de carga a los 15mm (kgf) | 146,00 | | |
| Módulo de ruptura 15mm (Mpa) | 1,44 | 1,38 | 1,56 |
| Des. Es Modulo de ruptura | 0,09 | | |
| Módulo de ruptura promedio (MPa) | 1,46 | | |

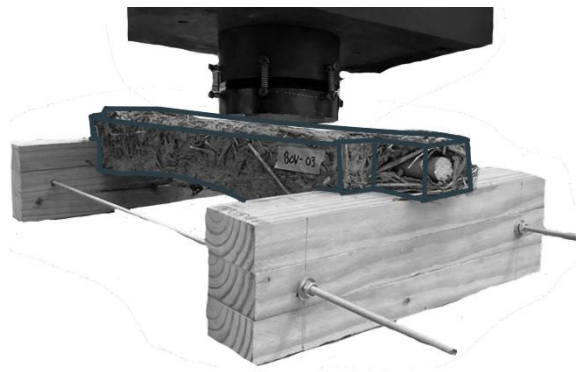


Figura 4 Evaluación de las piezas

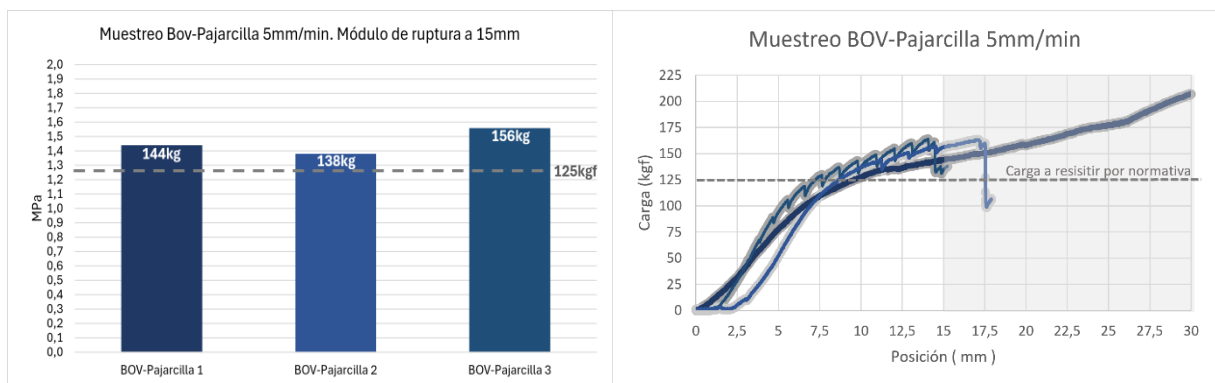


Figura 5 Resultados de muestreo en prueba por desplazamiento

Con resultados favorables en el primer muestreo, se replicó el procedimiento de evaluación con 3 tierras distintas, cuyos códigos quedaron de la siguiente forma: tierra arcillosa (BOV-PArc 4,5,6), tierra limosa (BOV-Plim 1,2,3) y tierra arenosa (BOV-PArn 1,2,3).

Tabla 2 Resultados en prueba por desplazamiento, tierra como variable

| Codigo | ARCILLOSA | | | LIMOSA | | | ARENOSA | | |
|------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | BOV-PArc 4 | BOV-PArc 5 | BOV-PArc 6 | BOV-Plim 1 | BOV-Plim 2 | BOV-Plim 3 | BOV-PArn 1 | BOV-PArn 2 | BOV-PArn 3 |
| Densidad | 1141,72 | 1018,33 | 1055,99 | 1100,05 | 1054,39 | 1081,63 | 1023,94 | 945,42 | 1068,01 |
| Des. Es Densidad | 63,23 | | | 22,98 | | | 62,09 | | |
| Densidad promedio kg/m3 | 1072,012 | | | 1078,689 | | | 1012,456 | | |
| Desplazamiento a 125kg de carga | 11,932 | 10,001 | 5,061 | 13,113 | 6,871 | 6,179 | - | - | - |
| Carga resistida a los 15mm (kgf) | 143,00 | 159,00 | 199,00 | 139,00 | 187,00 | 203,00 | 52,00 | 63,00 | 76,00 |
| Des. Es Carga resistida a 15mm | 28,84 | | | 33,31 | | | 12,01 | | |
| Promedio de carga a los 15mm (kgf) | 167,00 | | | 176,33 | | | 63,67 | | |
| Módulo de ruptura 15mm (Mpa) | 1,43 | 1,59 | 1,99 | 1,39 | 1,87 | 2,03 | 0,52 | 0,63 | 0,76 |
| Des. Es Modulo de ruptura | 0,29 | | | 0,33 | | | 0,12 | | |
| Módulo de ruptura promedio (MPa) | 1,67 | | | 1,76 | | | 0,64 | | |

Las tres piezas de tierra arcillosa superaron los 125kgf sin presentar fractura y sin llegar a los 15mm de desplazamiento. Además, una vez terminada la prueba y retirada la carga de las piezas modulares, éstas recobraban parcialmente su forma inicial, mostrando un comportamiento dentro de la región elástica.

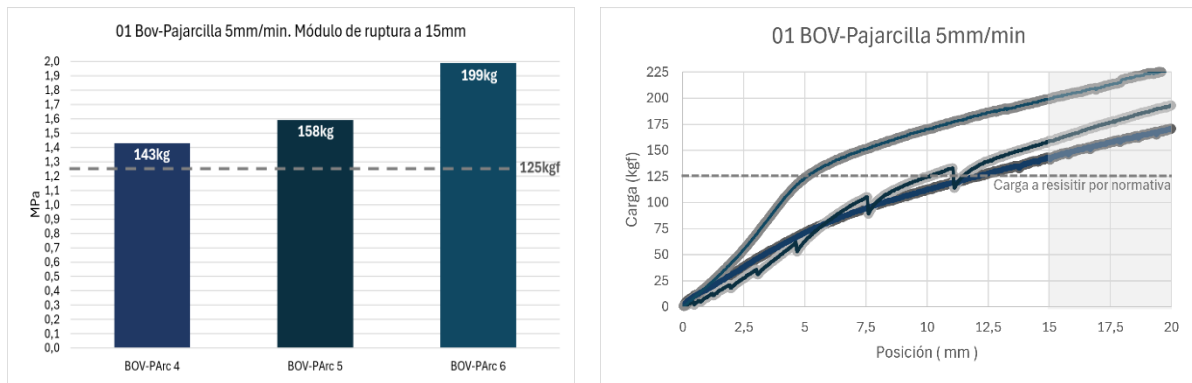


Figura 6 Resultados de prueba por desplazamiento en mezcla con tierra arcillosa

Los resultados con la tierra limosa no fueron muy diferentes a los de la tierra arcillosa. Todas las piezas superaron los 125kgf sin presentar fractura y previo a los 15mm de desplazamiento, presentando también el comportamiento “elástico” de las piezas con tierra arcillosa.

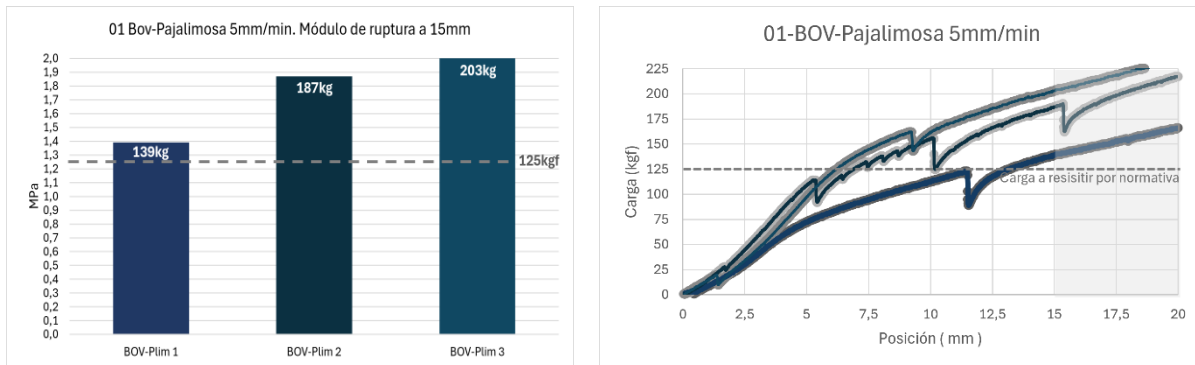


Figura 7 Resultados de prueba por desplazamiento en mezcla con tierra limosa

Para el caso de las piezas con tierra arenosa, los resultados no fueron favorables. Ninguna pieza alcanzó los 125kgf y esto se debe a la forma en que se está aplicando la carga, ya que, al ser por desplazamiento, la carga no aumentará mientras la pieza no muestre resistencia, por lo que se puede hablar de una pieza demasiado dúctil.

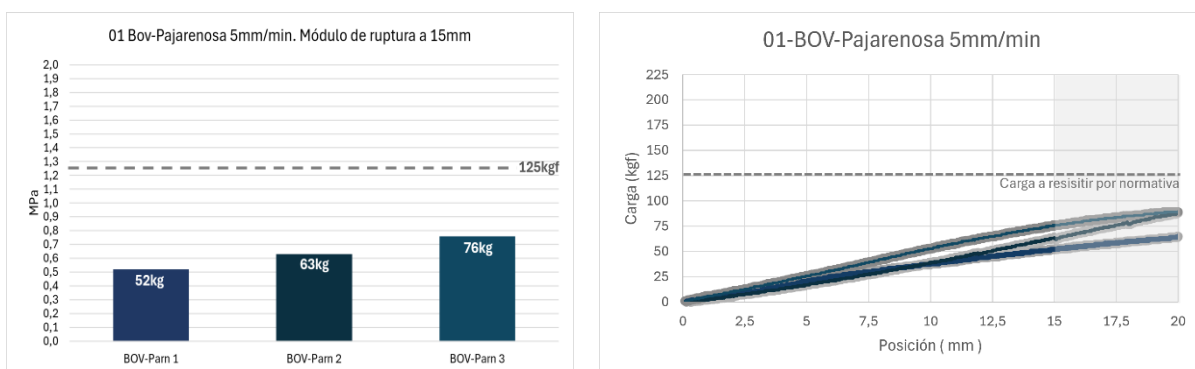


Figura 8 Resultados de prueba por desplazamiento en mezcla con tierra arenosa.

5.3 Evaluación por carga

Tras los resultados de la evaluación por desplazamiento, se realizaron las evaluaciones a la pieza, esta vez aplicando los 125kgf/min. Como se postulaba que la velocidad de la carga podría ser alta, se realizó un primer muestreo aplicándola en 2min. Al analizar la respuesta mecánica de las piezas, se procedió a aplicar la carga tal como lo indica la norma, es decir, a 125kgf/1min. Las piezas quedaron nombradas de la siguiente forma: tierra arcillosa (BOV-PArc 7,8,9), tierra limosa (BOV-Plim 4,5,6) y tierra arenosa (BOV-PAm 4,5,6).

Tabla 3 Resultados en prueba por carga, tierra como variable

| | ARCILLOSA | | | LIMOSA | | | ARENOSA | | |
|-------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Código | BOV-PArc 7 | BOV-PArc 8 | BOV-PArc 9 | BOV-Plim 4 | BOV-Plim 5 | BOV-Plim 6 | BOV-Parn 4 | BOV-Parn 5 | BOV-Parn 6 |
| Densidad | 1141,72 | 1018,33 | 1055,99 | 1100,05 | 1054,39 | 1081,63 | 1023,94 | 945,42 | 1068,01 |
| Des. Es Densidad | 63,23 | | | 22,98 | | | 62,09 | | |
| Densidad promedio kg/m3 | 1072,012 | | | 1078,689 | | | 1012,456 | | |
| Desplazamiento a 125kgf de carga | 14,897 | 10,446 | 8,376 | 13,297 | 7,112 | 7,080 | 47,800 | 21,317 | 18,477 |
| Promedio desplazamiento a 125kgf de carga | 9,411 | | | 7,096 | | | 19,897 | | |
| Carga máxima aplicada (kgf) | 125,00 | 125,00 | 125,00 | 125,00 | 125,00 | 125,00 | 122,00 | 125,00 | 125,00 |

Todas las piezas resistieron la carga establecida en la norma. Al aplicar la carga en 2min, la deformación sufrida ante los 125kgf se vuelve el doble con relación a la sufrida cuando esta carga es aplicada en la mitad del tiempo (1min). Sin embargo, ambas deformaciones, siguen estando por debajo del 3% del claro.

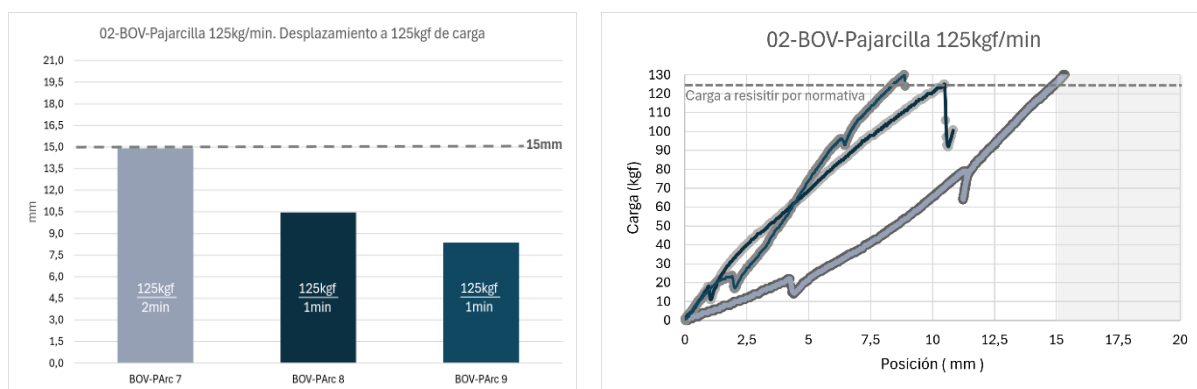


Figura 9 Resultados de prueba por carga en mezcla con tierra arcillosa

Nuevamente, los resultados presentados en las piezas con tierra limosa son similares a los establecidos con una tierra arcillosa. Las 3 piezas resistieron lo establecido por la norma y la relación entre la deformación de la carga aplicada en 2 min y en 1min es de 2:1, nuevamente por debajo de los 15mm.

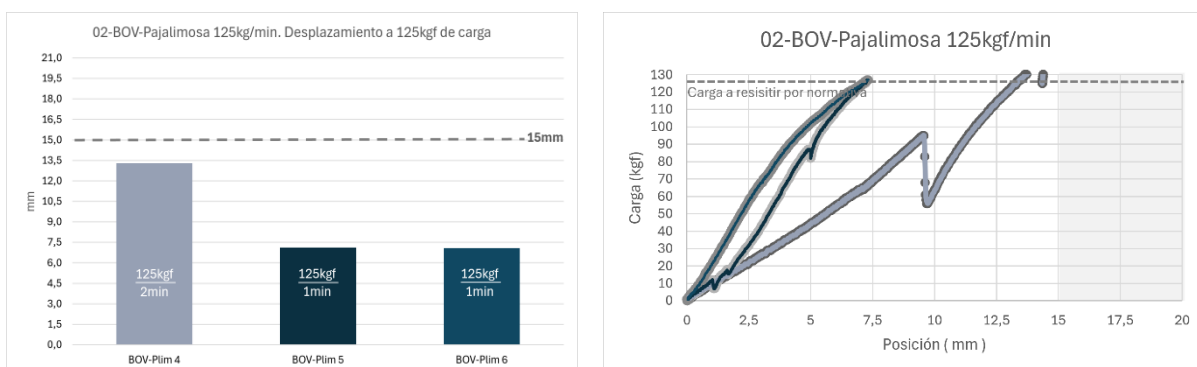


Figura 10 Resultados de prueba por carga en mezcla limosa

Esta vez las piezas modulares con tierra arenosa lograron resistir los 125kgf, por lo que se establece que también cumple con la norma, ya que no se presentó fractura. A pesar de esto, las deformaciones sufridas están por encima de los 15mm, pero se sigue encontrando una relación del doble entre la deformación ante la carga a 2min y a 1min.

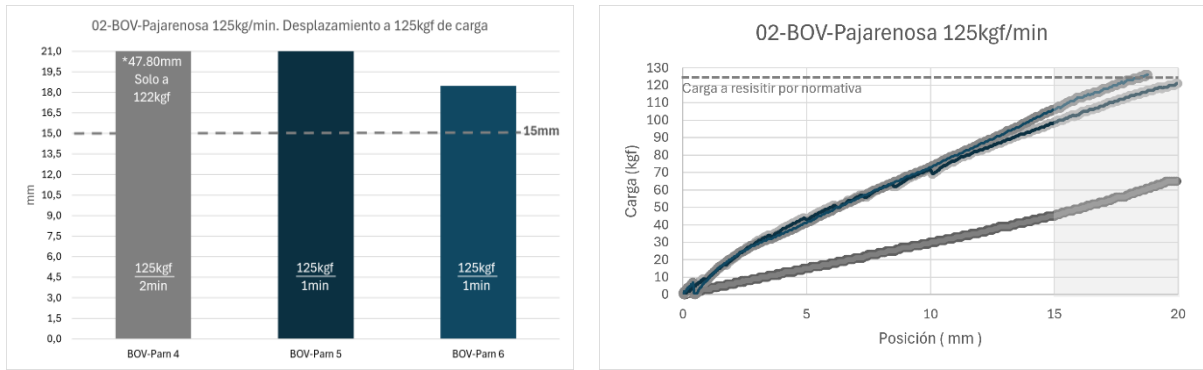


Figura 11 Resultados en prueba por carga en mezcla con tierra arenosa

5.4 Evaluación del refuerzo interior

Aunque se observó que la pajarcilla tiene una respuesta mecánica favorable, se evaluó por separado el refuerzo interior de madera para despejar la duda sobre la interacción de ambas partes para la resistencia de la pieza. Aun cuando los refuerzos lograron resistir poco más de 100kg, la deformación sufrida es mucho mayor a la reportada por las piezas ante esta carga. Se observó que la pajarcilla, absorbe la deformación de la pieza, lo que retrasa la ruptura del refuerzo. Incluso, en las pruebas por desplazamiento donde se rompió el refuerzo, la pieza seguía mostrando resistencia.

Tabla 4 Resultados en prueba de refuerzos

| Codigo | Refuerzos interiores | | |
|--------------------------------------|----------------------|--------|-------|
| | REF-1 | REF-2 | REF-3 |
| Carga máxima aplicada (kgf) | 103,00 | 108,00 | 83,00 |
| Des. Es Densidad | 13,23 | | |
| Promedio de carga max aplicada (kgf) | 1072,012 | | |
| Desplazamiento a 125kg de carga | - | - | - |
| Carga resistida a los 15mm (kgf) | 74,00 | 87,00 | 58,00 |
| Des. Es Carga resistida a 15mm | 14,53 | | |
| Promedio de carga a los 15mm (kgf) | 73,00 | | |

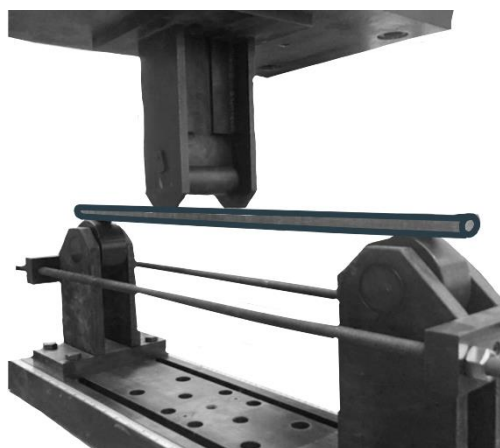


Figura 12 Evaluación del refuerzo interior

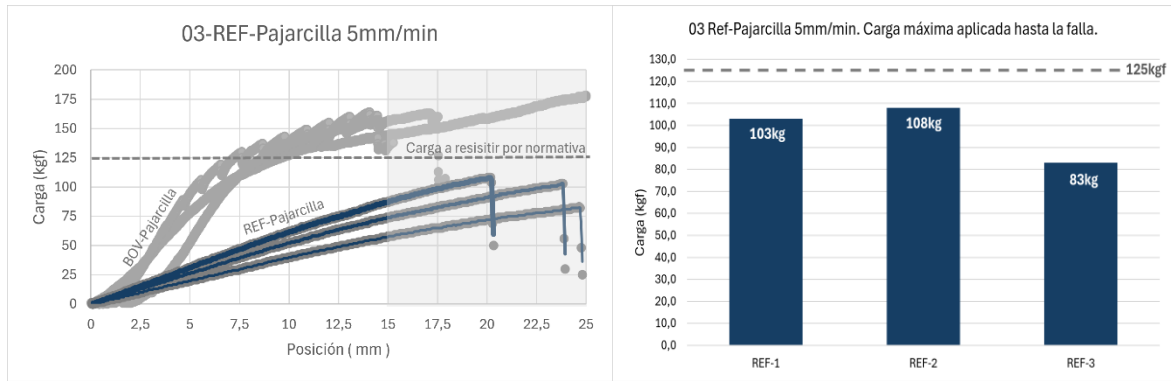


Figura 13 Resultados de prueba de refuerzos

5.5 Validación del entrepiso

Como la norma establece que el método de ensayo seleccionado deberá definirse específicamente para cada caso de interés. Para este estudio, se entiende que la validación del entrepiso completo se puede dar a partir de sus componentes. De este modo, las piezas modulares que, resistan los 125 kgf marcados en la NMX-C-463 (2009), se pueden tomar como resultados aprobados por la normatividad vigente para utilizarse en entrepiso.

Como complemento, también se calculó la carga que deberá resistir cada pieza dentro del sistema a partir de la masa aplicada sobre cada metro cuadrado calculada con las NTC (2017). Pero como la división de la carga no sucede de esta forma y el cálculo de esta forma únicamente solicita una resistencia de 30kg por pieza, se opta por reivindicar lo establecido en la NMX-C-463.

Por lo tanto, se puede ratificar que, toda vez que se cumpla lo establecido en la prueba de las piezas modulares, éstas pueden ser utilizadas en el entrepiso.

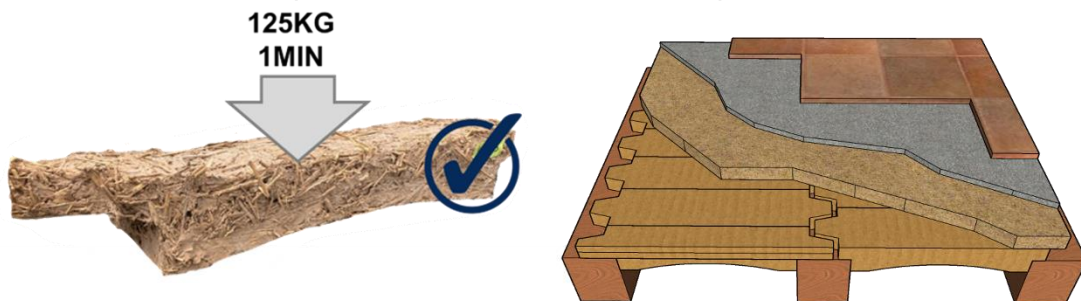


Figura 14 Validación del método por correlación de resultados

6 CONCLUSIONES

A pesar de que la estructura principal son las vigas de madera y como se mencionó, trabajan en conjunto con la pajarcilla, estos componentes no fueron probados debido a que existen diversos resultados, registros mecánicos y criterios de diseño, que permiten cumplir con lo establecido en la norma. Por lo tanto, una vez que cada parte del sistema de entrepiso cumplió con lo establecido, se validó la propuesta en conjunto. Este trabajo se avocó en evaluar mecánicamente la pajarcilla y determinar el nivel de cumplimiento con las normas mexicanas con las que se puede vincular, debido a la ausencia de estándares específicos. Sin embargo, se detectó que los criterios y métodos de evaluación para otros materiales terminan no siendo los más adecuados, por lo que requieren modificaciones y adaptaciones. Con esto no se propone una norma restrictiva que dicte las resistencias que debe cumplir la pajarcilla sino, una donde se establezcan los métodos para poder evaluarla como cualquier material de construcción.

El desempeño mecánico de las piezas dependerá del modo en que se evalúan. Al realizarlo propiciando el desplazamiento (5mm/min) lo que se buscaba era conocer la carga máxima que podría llegar a soportar cada pieza y, por tanto, determinar su resistencia, mientras que al realizarlo por carga (125kgf/min) el objetivo era determinar si se cumplía con la norma. El tipo de tierra como variable se evaluó debido a la conocida diversidad de los suelos, la cual puede llegar a generar un alto grado de incertidumbre. Con los resultados favorables al realizar la evaluación de acuerdo con la NMX-C-463 indiferentemente del tipo de tierra utilizada en la mezcla, se cuenta con mayor seguridad en la propuesta, ya que aún las piezas realizadas con tierra arenosa tuvieron respuestas aceptables. Sin embargo, como su nombre lo indica, y lo respaldaron las pruebas por desplazamiento, la tierra óptima para esta propuesta es la arcillosa, debido a la interacción que alcanza con las fibras.

Por último, entendiendo que los resultados aquí presentados se lograron en condiciones de laboratorio y con determinado tipo de tierras se recomienda tomar cada caso como único, por lo que la evaluación particular de cada sistema de entrepiso de pajarquilla se vuelve vital.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acevedo Oliva, R.; Broughton Weine, J.; Carrillo Zúñiga, O. (2019). Construcción con quincha liviana. Sistemas constructivos sustentables de reinterpretación patrimonial. Ministerio de las Culturas, las Artes y el Patrimonio.

Auroville Earth Institute (s/f). Hourdi roofing. Architecture. Recuperado el 12 de noviembre de 2022, de <https://dev.earth-auroville.com/hourdi-roofing/>

Caballero Cervantes, A. (s/f). Notas sobre bioconstrucción.

Caballero Cervantes, A.; Guerrero Baca, L. F. (2021). Técnicas de bioconstrucción. En *Experiencias de bioconstrucción: conceptos generales y visiones desde México*. Bonilla Artigas, .p. 52–59.

Caballero Cervantes, A.; Hernández Flores, H.; Sosa Contreras, A. (2022,). Proceso constructivo de pajarquilla para entrepisos.

Casares Ruiz, G.; Gustamante Montoro, R. (s/f). Arquitectura de tierra en el S.XXI.

Castañeda Nolasco, G. (2022). Evaluación de la tecnología para techos Domotej. En *Domotej. Tecnología para techos de vivienda de producción asistida*. Universidad Autónoma de Chiapas. p. 141–226.

Cevallos Salas, P. (2015). La construcción con tierra en el Ecuador y la necesidad de la norma. Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, 15. *Memorias...* Cuenca, Ecuador: PROTERRA/Projeto vliirCPM/Universidad de Cuenca. p. 603-613

Daneels, Annick (2020). Introducción. En A. Dannels (Ed.), *Arquitectura Mesoamericana de Tierra*, Vol. 1, p. 11–23. Instituto de Investigaciones Antropológicas. Universidad Nacional Autónoma de México.

Dávila Urrejola, V.; Contreras Silva, J. (2022). ¿Qué es el adobillo? En A. Riquelme Bravo (Ed.), *El adobillo*. Cultura constructiva de Valparaíso, p. 11–19.

Guerrero Baca, L. F. (2007). *Arquitectura de tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva*. Apuntes, 20(2), 182–201.

Guerrero Baca, L. F. (Comp.). (2019). *Bioconstrucción a detalle*. IBOMEX

Gutierrez, A.; Chandler, A.; Shilova, E.; Ayati, B.; Nichols, P.; Omowunmi Ogundare, F.; Ciftci, B.; Arvindkumar Patel, H.; Taha, R.; Ranasinghe, K.; Sai Ganji, M.; Borda, A.-M.; Gillespie, A.; Ukabhai Dungrani, M.; Klimenteva, A.; Henley, S.; Tsakiridis, G.; Nikitidis, P.; Singer, P. (2022). Sugarcrete. Slab report. <https://uel.ac.uk/>

Jorquera Silva, N. (2013). Culturas sísmicas en tierra. Estrategias locales de respuesta de la arquitectura de tierra chilena. Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, 13. *Memorias...* Valparaíso, Chile: PROTERRA/Duoc, p. 19-30.

Labat, M.; Magniont, C.; Oudhof, N.; Aubert, J.-E. (2016). From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential. *Building and Environment*, 97, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.004>

Michiels, T. L.; Fonseca Ferreira, C. (2013). Técnicas de estabilización sismorresistente para mejorar el comportamiento estructural de edificios históricos de tierra. *Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra*, 13.. Memorias... Valparaíso, Chile: PROTERRA/Duoc, p. 31–46.

NMX-C-463 (2009). Industria de la construcción – Bovedilla de poliestireno expandido para losas de entresijos y azotea de concreto a base de viguetas prefabricadas - Especificaciones y métodos de ensayo. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación

NMX-C-406 (2019). Industria de la construcción - Componentes para sistemas de losas prefabricadas de concreto - Especificaciones y métodos de ensayo. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación

NTC (2017). Normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones. Reglamento de construcciones para el Distrito Federal.

ONNCCE (2023). Catálogo de normas. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación

Sánchez Mora, R. (1983). Machimbloque de tierra comprimida estabilizada. Tercer Simposio CIB/RILEM.

Sosa Contreras, A. (2023). Entresijo semi-prefabricado de tierra aligerada. *Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra*, 21. Memorias... Bogotá/Tibasosa, Colombia: PROTERRA/Universidad Nacional de Colombia/Escuela Taller de Boyacá. p.987.

Habitat (1992). Floors above ground level. En *Earth Construction Technology*. p. 74–81. United Nations Centre for Human Settlements

Vargas Neumann, J. (2013). Consideraciones para incluir la técnica del tapial en la normativa de tierra peruana. Memorias 13 SIACOT “Material universal, realidades locales”, 885–895.

Volhard, F. (2016a). Floors and ceilings. En *Light earth building. A handbook for building with wood and earth*, p. 107–118. Birkhäuser.

Volhard, F. (2016b). Light earth brick and blocks. En *Light earth building. A handbook for building with wood and earth*, p. 130–134. Birkhäuser

Volhard, F. (2016c). Light earth panels. En *Light earth building. A handbook for building with wood and earth*, p. 135–136. Birkhäuser.

Yamín Lacouture, L. E.; Phillips Bernal, C.; Reyes Ortiz, J. C.; Ruiz Valencia, D. (2007). Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. *Apuntes. Revista de estudios sobre patrimonio cultural*, 20(2), 286–303.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias al apoyo del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), al Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales (LMSE) de la UNAM y al Proyecto San Isidro: Educación permanente s.c. Así mismo a la UABC por su apoyo y facilidades para trabajar y estudiar los materiales naturales.

AUTORES

Alan Sosa Contreras, arquitecto por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, semestre cursado en el máster de ingeniería civil en INSA, Rennes. Maestrante en Tecnologías de la Arquitectura en la Universidad Nacional Autónoma de México. Colaboró en el taller “construcción con tierra para maestros albañiles” UNAM-HOLCIM-CEELA. Ponente en la Red de Vivienda y Hábitat Sustentable de México.

Luis Fernando Guerrero Baca, arquitecto, Maestro en restauración arquitectónica y Doctor en diseño con especialidad en conservación patrimonial. Profesor investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco desde 1987. Miembro de la Red Iberoamericana PROTERRA y de la Cátedra UNESCO “Arquitecturas de tierra, culturas constructivas y desarrollo sostenible”.

Tonatiuh Magaña Guzmán, Diseñador Industrial, Maestro en Arquitectura con especialidad en construcción con pacas de paja; profesor-investigador de la Universidad Autónoma de Baja California Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología desde 2022. Miembro de la Cátedra UNESCO “Arquitecturas de tierra, culturas constructivas y desarrollo sostenible”.