

PROCESO CONSTRUCTIVO DE UNA CUBIERTA DE PAJARCILLA

Tonatiuh Magaña-Guzmán¹, Luis Fernando Guerrero-Baca², Gonzalo Bojórquez-Morales³

¹ Universidad Autónoma de Baja California-FCITEC, Tijuana, México, tonatiuh.magana@uabc.edu.mx

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

³ Universidad Autónoma de Baja California-FAD, Mexicali, México, gonzalobojoquez@uabc.edu.mx

Palabras clave: materiales naturales, substrato arcilloso, light straw clay, barbotina, módulo

Resumen

En la actualidad, debido al cambio climático y la conciencia de cuidar el planeta, hay cada vez más interés en la edificación con materiales naturales, pero son pocos los estudios sobre cubiertas de pajarcilla. Es por eso que se planteó como objetivo analizar el proceso constructivo de cada una de las etapas de una cubierta de pajarcilla siendo ésta la primera etapa de una investigación que contempla el estudio de su desempeño higrotérmico e impacto ambiental. Se construyó una cubierta de pajarcilla edificada sobre un módulo a escala real, seca y protegida del agua. Se documentó los elementos que componen la estructura de la cubierta y el proceso constructivo con pajarcilla. Para los sustratos arcillosos se tiene el registro de las pruebas de campo y resultados del laboratorio de mecánica de suelos. Sobre la mezcla se tiene la densidad, cantidad de materiales, proceso de compactado, tiempos de fabricación y herramienta utilizada. Como resultado se tuvo diferencia de densidades en las probetas de pajarcilla; aunque las proporciones de las materias primas se basaron en las referidas en el código de construcción. Al momento del corte de las probetas de pajarcilla, se observa una distribución de acuerdo con el sentido del compactado.

1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo documenta el proceso constructivo de una cubierta de pajarcilla construida a escala real sobre un módulo para su futuro monitoreo de desempeño higrotérmico e impacto ambiental, en la ciudad de Tijuana Baja California, México.

Los sistemas constructivos realizados con tierra como el adobe, el tapial, el bajareque, etc., comúnmente se emplean en la edificación de muros, pero son menos frecuentes en entresijos y techos debido a su peso. Sin embargo, existe una estrategia de aligeramiento que ha sido empleada desde hace mucho tiempo en la que, usando las mismas materias primas, se consigue disminuir su densidad gracias a su mezclado con fibras, especialmente de paja. Este sistema al que se denomina “pajarcilla” se ha empleado en México desde hace treinta años por lo menos, pero no ha sido analizado sistemáticamente para evaluar su comportamiento estructural y respuesta higrotérmica.

Sobre el uso de la pajarcilla en cubiertas, el trabajo de (Holzhueter; Itonaga, 2017) hace una breve descripción de uso en la cubierta en una obra en Japón, pero éste no indica el proceso de selección del sustrato arcilloso, la selección de las cantidades de la mezcla o el del proceso constructivo de la pajarcilla en la cubierta. En otros casos la información se enfoca al proceso constructivo de la cubierta de pajarcilla (Caballero; Guerrero, 2021), aunque, por ser un trabajo de recopilación de casos prácticos, no se indican los procesos de selección de arcilla, el añejado ni la dosificación de las materias primas. Volhard (2016) hace mención a su uso en cubiertas y diferentes tipos de rieles y posibilidades de colocación de la mezcla sobre los elementos de carga. Con esos antecedentes, el objetivo del presente estudio consiste en su primera parte en documentar y analizar el proceso constructivo de cada una de las etapas de una cubierta con pajarcilla con estructura interna y la cual sólo requiere de una cimbra temporal, quedando suspendida entre los claros de las vigas.

La cubierta de pajarcilla es una técnica de construcción donde la estructura se forma de vigas de madera que soportan todos los esfuerzos de la flexión (Caballero; Guerrero, 2021). Sobre

las vigas separadas a cada 0.6 m a eje, se fija por la parte inferior una cimbra, que puede estar cubierta de aceite como desmoldante. La estructura que soporta la pajarcilla está compuesta por rieles hechos de tramos de madera de sección circular (palos de escoba) de 0.022 m de diámetro por 1.22 m de largo, que se atornillan a las vigas principales del, por debajo del eje a centro (Caballero; Guerrero, 2021) y soportan travesaños perpendiculares.

El proceso inicia con el análisis de referencias de las características constructivas de una cubierta de pajarcilla sin cimbra perdida, la ejecución de pruebas de campo y laboratorio al sustrato arcilloso. La elección de la mezcla se realizó de acuerdo con la densidad seleccionada y la dosificación de materia primas de la mezcla se basó en el código de construcción de los Estados Unidos de América, a partir de la cual se cuantificaron las materias primas, se preparó la barbotina y mezcló con fibra y agua para dejar añejar. Luego se edificó un módulo con muros de bloques de cemento sobre los que se instalaron las vigas, rieles, travesaños y cimbra sobre la que finalmente se construyó la cubierta de pajarcilla. El módulo tiene escala real, la techumbre tiene una pendiente hacia el sur y las fachadas están orientadas a los cuatro puntos cardinales.

2 PAJARCILLA

La técnica de pajarcilla, como se le conoce en México, se compone de paja y arcilla, donde predomina el primer material. Es una técnica tradicional que ha perdurado por varios siglos, pero su sistematización surgió de una iniciativa llevada a cabo en Alemania en 1920 (Volhard, 2016). Es una mezcla que se coloca como relleno entre los soportes de una estructura generalmente de madera y se requiere de una cimbra donde se vierte y compacta (Volhard, 2016). Es una opción para muros con densidades menores a 1,200 kg/m³ (Minke, 2013).

En países de habla hispana como Chile se le llama *quincha liviana húmeda, tierra alivianada con paja o barro-paja liviano* (Romina; Carrillo, 2017) o *tierra alivianada encofrada o TAE* (García, 2023). En Argentina también se le denomina *paja encofrada* (Belanko, 2013) o *paja y arcilla* (González et al., 2011), en Alemania como *leichtlembau* (Doleman, 2017).

En Inglés se denomina *light earth* (Volhard, 2016), *light straw clay* o por sus siglas *LSC* (Baker-Laporte; Laporte, 2015) así como *light clay, straw clay, slip straw o rammed straw* (Doleman, 2017).

El código de construcción de pajarcilla de Estados Unidos de América (EUA) la define como una mezcla de paja y barbotina de arcilla, compactada y secada para brindar aislamiento con acabados de yeso; entre o alrededor de elementos estructurales o no estructurales de una pared (IRC, 2018).

Se clasifica en tres densidades: alta, media y baja, Volhard (2016), la considera ligera cuando tiene un rango de 300 a 800 kg/m³ y pesada cuando su densidad va de 800 a 1,200 kg/m³. En el proceso de preparación de la mezcla se ha buscado obtener densidades entre los rangos de 480 a 560 kg/m³, de 640 a 720 kg/m³ y de 800 a 880 kg/m³ (CMHC, 2004).

2.1 Usos de la pajarcilla

La pajarcilla tiene poca conductividad térmica por lo que provee buen aislamiento, lo que reduce el consumo energético y las emisiones de CO₂ por concepto de calentamiento o enfriamiento de espacios (Holzhueter; Itonaga, 2017). Al respecto algunos autores reportan rangos de conductividad térmica de 0.067 W/mk (Holzhueter; Itonaga, 2017); 0.090 W/mK (CMHC, 2004) y de 0.1 W/mk (Drozd et al., 2019).

En pisos se utilizan placas de pajarcilla como material aislante; se forman de 0.60 x 0.60 x 0.10m de alto; para ello se prepara la mezcla, se coloca dentro de moldes, se apisona y se retira el molde para su secado en el medio natural (Belanko; Natan, 2019)

En el caso de muros con pajarcilla, esta técnica requiere de una estructura generalmente en madera, tanto en muros exteriores como interiores, cimbras fijadas en ambos lados de la

estructura, así como un elemento físico que funcione como un candado, al colocar la mezcla dentro se compacta con un pisón manual. El código de construcción de EUA refiere colocar un soporte horizontal a cada 0.80m; indica posibilidades de muros de 0.304 m de ancho (IRC, 2018).

Otra variante en muros es con bloques, previamente elaborados y secados al sol (Strozs; Sahmenko, 2011). En esta modalidad la mezcla de pajarcilla se introduce en un molde, los tamaños varían dependiendo de la necesidad; en la Patagonia andina argentina se ha documentado su uso con dimensiones de 0.50x 0.25 x0.21m para un ancho de muro de 0.25 m (González et al., 2011).

En entresijos de pajarcilla se utiliza una estructura interna con rieles y travesaños separados a cada 0.15m (Caballero; Guerrero, 2021) describe e ilustra el proceso que realiza en México para su fabricación con pajarcilla. Otras aplicaciones incluyen entresijos (Volhard, 2016).

En las cubiertas de pajarcilla, el sistema es similar al de muros la diferencia radica en que el material y la cimbra se colocan de manera horizontal respetando la inclinación que tiene la cubierta; se tiene que emplear una cimbra base y una cimbra en la parte superior y se rellena con material en capas de no más de .01m de ancho (Caballero; Guerrero, 2021).

2.2 Código de construcción Estados Unidos de América

La información que predomina sobre el sistema constructivo de pajarcilla es de su uso en muros y de sus propiedades térmicas; EUA tiene un código para construcción de muros con pajarcilla denominado Appendix AR Light Straw Clay Construction (IRC, 2018).

Éste refiere la definición de la técnica, las definiciones de las materias primas, sus composiciones, pruebas y características que debe cubrir el sistema constructivo para su empleo en muros tapón; así mismo ilustra diferentes sistemas de estructuras para la construcción y los criterios de diseño para la construcción con pajarcilla como material de relleno en muros. Así mismo especifica en una tabla los requerimientos y propiedades de las mezclas (IRC, 2018).

3 CUBIERTA DE PAJARCILLA

El método seguido incluyó: 1) revisión de referencias; 2) diseño y modelado de la cubierta; 3) construcción de paredes del módulo al que se denominó M-CPA; 4), preparación de materia prima y mezcla de pajarcilla; 5) construcción de la estructura de la cubierta de pajarcilla; y, 6) la construcción de la cubierta de pajarcilla.

3.1 Diseño de módulo para monitoreo.

Para documentar el sistema constructivo de pajarcilla en cubiertas, se definió construir un módulo con la cubierta de pajarcilla, a este se le denominó M-CPA

La altura interior en la fachada sur y lado más bajo de los módulos es de 2.3m, siendo éste el mínimo de altura establecido en el reglamento de construcción de la ciudad de Tijuana que es de 2.3m; la fachada norte en el interior de los módulos es de 2.5m. Los muros de los módulos se construyeron con bloques de concreto de 0.15x 0.20x 0.40 m y pegados con motero de cemento, arena y agua; se emplazaron con una alineación de sur a norte. En la figura 1 se aprecia la planta arquitectónica y fachada este del M-CPA.

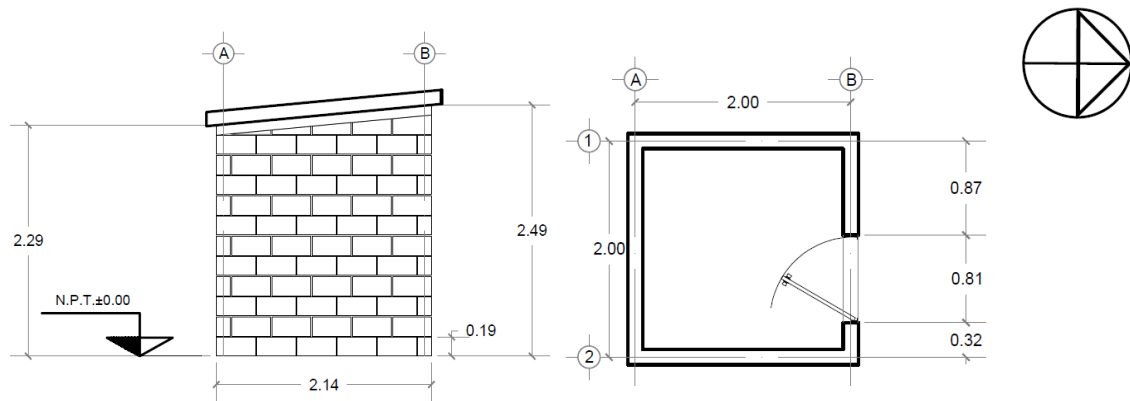


Figura 1. Dimensiones módulo para monitoreo

3.2 Diseño de cubierta con pajarcilla

Se modeló la cubierta de pajarcilla y su estructura en el programa de dibujo *SketchUp Pro*, basado en las indicaciones de (Caballero; Guerrero, 2021) donde paralelo a las vigas principales de madera, debajo del eje a centro se fijaron los rieles que tienen la función de cargar los travesaños colocados de manera perpendicular, separados a cada 0.20m. Sobre las estructuras internas de pisos, (Volhard, 2016) refiere que hay distintas posibilidades de rieles y travesaños, sugiere una separación entre travesaños de 0.15 a 0.20m.

La estructura se compone de cuatro vigas principales de madera con dimensiones de 0.1 x 0.1 x 2.44 m que soportan las cargas vivas y muertas. El segundo elemento son los rieles de madera de uso comercial para palos de escoba con un diámetro de 0.022x1.20 m de largo y con un peso de 0.258 kg a temperatura ambiente y el tercer componente son los travesaños de palos de escoba de un diámetro de 0.022 x 0.5 m de largo. En la figura 2 aprecia el sistema de la estructura que soporta la cubierta de pajarcilla, dimensiones, ubicación y la inclinación hacia el sur.

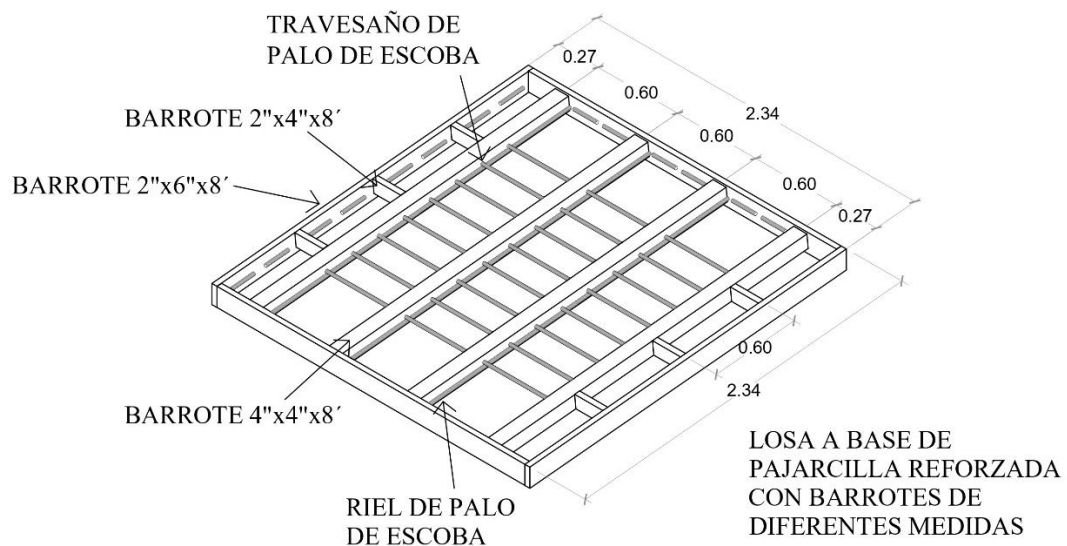


Figura 2. Isométrico de la cubierta de pajarcilla

3.3 Herramientas

a) Cimbra

La cimbra de acuerdo con González (2009) es una estructura provisional de diferentes materiales que sirve para soportar y moldear elementos. Respecto a las cimbras usadas en cubiertas (Volhard, 2016) refiere que se clasifican en: cimbra perdida o cimbra temporal.

Para la construcción de la cubierta con pajarcilla se coloca una cimbra corrida en la parte de abajo y unas angostas en la parte superior que conforme se van llenando se van intercalando. (Baker-Laporte; Laporte, 2015) refieren que se puede remover al instante. Para fijar la cimbra temporal, (Doleman, 2017) recomienda utilizar tornillos para madera conocidos como “pijas”, pero de cabeza hexagonal.

Las cimbras superiores se van retirando y colocando al frente conforme avanza el compactado, acción que se repite hasta terminar de rellenar con material el espacio cimbrado. Una vez rellena la cubierta se procede a retirar las cimbras superiores como inferiores (Caballero; Guerrero, 2021).

b) Pisón

El pisón es un dispositivo de madera, utilizado para compactar la tierra (Norma E.080, 2017). Los pisones tienen una longitud de 0.30 a 0.60m y se elaboran a partir de una tabla de 0.05 x 0.10m de ancho por largo y se redondea en el extremo por donde se manipula (Volhard, 2016). En la figura 3 se aprecia los pisones utilizados en el compactado de la pajarcilla en la cubierta.



Figura 3. Pisones empleados

3.4 Materias primas para la pajarcilla

Con base en las referencias existentes se optó por el empleo de paja de trigo y sustratos arcillosos; respecto al agua ésta se usó la suministrada por la red pública.

La mezcla de material preparado para el experimento se consideró en metros cúbicos para la elaboración de la cubierta de pajarcilla del módulo con un área de 6m² por un espesor de 0.01m. Para el estudio se utilizó paja de trigo a partir de pacas de tres hilos provenientes del valle de Mexicali, B.C. con un peso promedio de 46.32kg a temperatura ambiente. El (IRC, 2018) indica que la paja es el tallo de cereal seco, después de que las semillas han sido removidas.

La tierra empleada contiene arcilla de media a alta plasticidad, para las pruebas de campo se consideraron sustratos arcillosos provenientes de la ciudad de Tecate Baja California, que son

de color rojo y fueron suministrados por proveedores de materiales pétreos locales. Las pruebas de campo de cordón se realizaron en el taller de cerámica de la Universidad Autónoma de Baja California-FCITEC a dos muestras de sustrato arcilloso M1-Tecate y M2-Valle; el proceso consistió en tomar un puñado de tierra, agregar agua y amasar hasta obtener el estado plástico del sustrato. Sobre una superficie se formó un cordón de 0.20m de largo y con un diámetro de 0.015m siguiendo las recomendaciones indicadas por (Doleman, 2017). La segunda prueba consistió en colocar una barra de la tierra arcillosa, sobre una hoja de papel y en la orilla de una mesa desplazarla lentamente para dejarla colgando a fin de provocar su ruptura (Minke, 2013). La muestra M1-Tecate no se partió en trozos lo que evidenció su elevada cohesividad. La muestra M2-Valle se fracturó en secciones cortas por lo que se descartó. La M1-Tecate se envió al laboratorio especializado en mecánica de suelos Geoservicios, ubicado en la Ciudad de Tijuana Baja California. Las pruebas de ensayo de distribución granulométrica y límites de Atterberg se basaron en NMX-C-416, ASTM C136 y ASTM D2487-11.

El contenido del sustrato M1-Tecate es de 3.2% gravas, 35.2% arenas, 61.6% finos; con una clasificación de suelo de CL (arcilla magra) de acuerdo con el SUCS.; con una contracción lineal de 5.5% y un límite plástico de 15.1%. A partir de estos resultados se eligió para el experimento de la cubierta de pajarcilla. En la figura 4 se observa la prueba de campo sugerida por Doleman (2017).



Figura 4. Prueba de herradura a sustrato arcilloso M1-Tecate

El proveedor de la tierra la extrae y luego la criba por una malla de 0.05m con la finalidad de retirar piedras y gravas. Como último ingrediente se tiene el agua, se utilizó la suministrada por la red potable del municipio de Tijuana.

Para la determinación de las cantidades de las materias primas de paja, tierra y agua se analizaron los datos referidos por distintos autores. Sobre la densidad, (Volhard, 2016) indica que entre menos densa sea la pajarcilla, tendrá mejor comportamiento como aislante y entre más densa, tendrá un comportamiento como masa térmica. Es casi imposible en la práctica obtener densidades de 500 kg/m^3 debido a que la paja se ablanda por la humedad provocada durante el proceso de mezclado (Minke, 2013). Cabe resaltar que alcanzar densidades específicas es un reto, dadas las variaciones en el material y la mano de obra (CMHC, 2004).

En la tabla 1 se aprecia las cantidades de materia prima manejadas por distintos autores para mezclas de pajarcilla.

Tabla 1. Proporciones de mezclas de pajarcilla

Autor	País	Paja	Tierra	Agua	Arcilla (%)	Densidad (kg/m ³)
Volhard, 2016	Alemania	70–90 kg/m ³	520 kg/m ³	NA		600
IRC, 2018	EUA	107.32 kg/m ³	373.23 kg/m ³	308.8 l/m ³	NA	480.6
			533.41 kg/m ³	360.9 l/m ³		640.74
			693.6 kg/m ³	411.7 l/m ³		800.92
Baker- Laporte, Laporte, 2015	EUA	½ paca de paja	1 cubeta de barbotina	NA	NA	800.92
Doleman, 2017	EUA	13.6 kg	12.7 kg	26.5 litros	40	NA
Romina, Carrillo, 2017	Chile	2 partes	1 parte	NA	NA	600
Holzhueter, 2017	Japón	1m ³	4.3m ³	NA	NA	356.27
Strozs, Sahmenko, 2011		80 kg/m ³	500 kg	50 kg	NA	470

3.5 Mezcla pajarcilla para la cubierta

En la mezcla se consideró que el material estará suspendido horizontalmente entre las vigas de madera y sujetado por los rieles de madera; para que puedan colocarse clavos o enchufes de para. Volhard, (2016) indica que la densidad de la pajarcilla debe ser mayor de 900 kg/m³. Por ello, las proporciones de los materiales de la mezcla se basaron en los indicados en el código de muros de pajarcilla de EUA para la densidad más alta referida de 801 kg/m³ (IRC, 2018).

Las cantidades finales de materiales requeridos para el experimento de la cubierta de pajarcilla y los bloques de referencia fue de 456.4 kg de tierra arcillosa del sustrato M1-TKT, 271 litros de agua potable y 70.36 kg de paja de trigo; las cantidades de cada material se obtuvieron a partir de la referencia de materiales para 1m³ de mezcla referidas en el código de construcción (IRC, 2018).

La preparación inició con el pesado de las materias primas en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la UABC-FCITEC en una báscula con capacidad de 150 kg marca Ohaus DEFENDER™ 3000 modelo D31P150BX, con auto calibración. La tierra se colocó en cubetas de plástico de 20 litros y se descontó el peso de cada recipiente; el agua se pesó en bidones de plástico con capacidad para 25 litros y así mismo se descontó el peso de los recipientes.

Preparación de barbotina

El objetivo de mezclar la paja con la arcilla es cubrir completamente la fibra con la barbotina la cual debe estar adecuadamente hidratada para penetrar entre los nódulos de fibras y adherirlas al secar (Baker-Laporte; Laporte, 2015). El preparado de la barbotina características y mezclas se basó en el trabajo de (Doleman, 2017) y (Baker-Laporte; Laporte, 2015).

Para preparar la barbotina se utilizó un taladro eléctrico de uso rudo marca Sears Dunlap de cabezal de ½ pulgada, al que se le colocó una paleta de metal de acabado niquelado, con diámetro de 0.120m con 4 aspas por 0.6m de largo, utilizada para revolver mortero, para un primer mezclado del sustrato y agua y que, a partir de ahora, llamaremos barbotina.

Esta actividad requirió una persona, en tanto que el tiempo de vaciado de los materiales en los recipientes y el mezclado con taladro fue de una hora y media; la longitud del aspa permitió alcanzar el fondo del recipiente y se detuvo el proceso de mezclado cuando al introducir el dedo meñique en la barbotina, éste se cubría de manera uniforme y con una mezcla densa como lo que indica (Doleman, 2017). La barbotina se dejó reposar por un periodo de dos días

para el proceso de añejado, como refiere Baker-Laporte y Laporte (2015); al tercer día antes de comenzar a preparar la pajarcilla se mezcló nuevamente con el taladro la barbotina contenida en los tres recipientes. Después de ello se obtuvo una mezcla sin terrones y con una condición a simple vista homogénea y espesa; se considera importante mencionar que la grava se depositó en el fondo de los recipientes.

La mezcla de pajarcilla se preparó en un cajón de madera del tamaño de un tablero de 1.22 x 2.44m y con paredes de una altura de 0.1m, previo a la colocación del material se humedeció la superficie de este y se esparció paja suelta sobre el área; después de ello se cubrió con la barbotina la paja.

El proceso de mezclado se realizó en tandas de mezcla; esto significa que se esparció paja, se bañó con barbotina, se mezcló y colocó en una lona donde se tapó y dejó reposar por 21 horas para una segunda maduración (Baker-Laporte; Laporte, 2015). En la figura 5 se aprecia la mezcla resultante.



Figura 5. Mezcla de pajarcilla antes de colocarse en la cubierta

3.6 Construcción de cubierta con pajarcilla

Continuó la edificación de un módulo y colocación de la estructura de vigas, rieles, travesaños y cimbra sobre la que se construyó la cubierta de pajarcilla. La techumbre tiene una pendiente hacia el sur y las fachadas están orientadas a los cuatro puntos cardinales.

Los travesaños de madera se colocan conforme se elabora la cubierta de pajarcilla a cada 0.2m como lo indica Caballero y Guerrero (2021) para una cubierta; una vez que el material llega al ras de la cimbra se fijó una segunda cimbra y se repite el proceso de llenado, compactado y colocación de travesaño.

Conforme se compacta el material se alternan las cimbras, para colocar la tercera, se retira la primera cimbra angosta temporal y se coloca después de la segunda cimbra, estas se fijaron con tornillos para madera de cabeza hexagonal y se colocaron o retiraron con un atornillador de impacto inalámbrico con un dado de cabeza hexagonal de (1/4”).

En la figura 6 se aprecia a dos trabajadores colocando dentro de la cimbra la pajarcilla para continuar con su compactado.

El proceso de construcción de la cubierta de pajarcilla incluyó dos personas. Comenzó con el aceitado de la cimbra en un periodo de 30 minutos más el proceso de colocación de pajarcilla en la estructura de la cubierta. El traslado y colocación de la pajarcilla en la cubierta, el proceso de cimbrado, compactado, colocación de travesaños y descimbrado superior tomó un tiempo de 3 horas y 20 minutos para un área de 6m² por 0.01m de espesor.

En el proceso de fabricación de 6 bloques de referencia (BR) intervinieron dos personas y el tiempo de dos horas 10 minutos, las actividades realizadas fue el traslado del material,

compactado de la mezcla dentro de los moldes. En seguida se desarmo el molde y se armó en un segundo espacio para fabricar las otras tres piezas de BR.



Figura 6. Construcción de cubierta con pajarcilla

El proceso de secado fue por un periodo de 4 semanas sin ninguna protección y expuesto a las condiciones ambientales, el interior de la cubierta la pajarcilla se dejó sin ningún tipo de recubrimiento. En la figura 7 se aprecia la pajarcilla suspendida entre las vigas principales de madera al interior del M-CPA; la cimbra interior se retiró al día siguiente de construida la cubierta y se secó con la puerta abierta por un periodo de 40 días, previo a la instalación de los sensores, sellado de infiltraciones e inició el monitoreo térmico y de humedad relativa.



Figura 7. Superficies interior y exterior de la cubierta

Pasado el periodo de secado sobre la cubierta de pajarcilla se colocaron dos tableros de triplay de 1.905 cm ($\frac{3}{4}$ ") sujetos a las vigas principales y vista perimetral de madera con tornillos para madera (chilillos) de 3,81 cm ($1 \frac{1}{2}$ ") de largo a cada 0.25 m de distancia entre sí. Sobre los tableros se colocó un cartón negro número 40 fijado con tachuela como base para es cuadras de cartón arenado; sobre el extremo se colocó un gotero galvanizado de 0.05 m de ancho por un largo de 2.44 m. Este sistema es común su empleo por la cercanía con la frontera.

Posteriormente se cubrió con hojas de triplay de 1.905 cm ($\frac{3}{4}$ ") y sobre las que se colocó cartón asfáltico y cartón arenado como protección ante la lluvia.

3.7 Densidad de la pajarcilla local

A partir de los BR se obtuvieron 7 probetas de cubos de 0.10 x 0.10 x 0.10 m para pruebas de compresión y 7 probetas de prisma rectangular de 0.12 x 0.12 x 0.36 m para pruebas de flexión. El promedio de las probetas de estudio se determinó a partir de las pruebas realizadas por CMHC (2004).

Las probetas se adecuaron en el laboratorio de Ingeniería civil, de la FCITEC, a partir de los BR con dimensiones de 0.15 x 0.44 x 0.55 m, se cortaron con una sierra de corte para rocas, concreto y mampostería de la marca CONTROLS, modelo 55-CO210/DZ de 220V, peso de 110 kg, y con un disco de diamante de 0.45 m de diámetro.

Se obtuvo piezas de pajarcilla en cubos con un promedio de dimensiones de 0.10 x 0.10 x 0.10 m de longitud, anchura y altura; para registrar sus medidas se utilizó un vernier digital marca Mitutoyo modelo CD-S6" CT que cumple con el ISO/IEC 17025 y el ANSI/NCSL Z540-1-1994. En la figura 8 se observa una de las probetas al momento de registrar sus dimensiones; ésta tiene una densidad promedio de 677.05 kg/m³.



Figura 8. Probeta cortada a partir de un bloque de referencia

4 RESULTADOS

Se tiene una cubierta de pajarcilla edificada sobre el módulo a escala real, seca y protegida del agua. Se tiene documentado los elementos que componen la estructura de la cubierta y el proceso constructivo con pajarcilla. De los sustratos arcillosos se tiene el registro de las pruebas de campo y resultados del laboratorio de mecánica de suelos. Sobre la mezcla se tiene la densidad, cantidad de materiales, proceso de compactado, tiempos de fabricación y herramienta utilizada.

5 CONSIDERACIONES FINALES

La construcción de componentes horizontales con la técnica de pajarcilla representa una estrategia con gran potencial de desarrollo de entresijos y techos tanto para la edificación de nueva planta como la recuperación de espacios patrimoniales. Esta condición deriva del hecho de que se trata de un sistema que emplea una cantidad relativamente reducida de tierra lo que incide en su menor peso e impacto ambiental. La elevada dosificación de fibras que incluye el sistema permite optimizar el trabajo, pero, sobre todo, generar componentes

constructivos ligeros, con mayor aislamiento tanto térmico como acústico en comparación con otros sistemas convencionales.

Estas cualidades resultan sumamente valiosas para el caso de la región norte de la República Mexicana en la que las condiciones climatológicas son sumamente extremas, presentando inviernos con temperaturas varios grados por debajo de cero y veranos con más de 40°C. En el caso específico de la región de Tijuana, Baja California, donde las precipitaciones pluviales son relativamente bajas, la incorporación de componentes de cubierta que tengan pendientes ligeras pero que se materialicen mediante sistemas autoportantes que sean ligeros y aislantes abre una amplia gama de oportunidades.

La investigación que se está llevando a cabo demuestra la viabilidad de aplicación del sistema constructivo de pajarilla soportada por estructura de madera en la que personal sin experiencia previa en el sistema logró apropiárselo y resolver los problemas técnicos de forma adecuada y en un tiempo competitivo, en comparación con las técnicas convencionales. Los estudiantes de arquitectura no solamente fueron espectadores del proceso, sino que pudieron ser parte de él, de manera que se incrementan sus alternativas de propuestas constructivas a partir del empleo de materiales locales, económicos y de bajo impacto ambiental.

El módulo que se edificó a finales del 2023 está siendo monitoreado y comparado con uno idéntico pero que se desarrolló con sistemas convencionales de origen industrializado. El comportamiento higrotérmico del interior de los módulos podrá ser evaluado a lo largo de un año para poder contar con datos reales que permitan sustentar el nivel de confort que es posible obtener a lo largo del año con la posible reducción de las horas del día en las que se emplean sistemas mecánicos de acondicionamiento de humedad y temperatura, lo que aunado al ahorro y reducción del impacto ambiental de los sistemas constructivos, abonará en la disminución de la huella ecológica de la vivienda.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM C136-06 (2015). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. USA: ASTM International

ASTM D2487-11, (2018). Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). USA: ASTM International

Baker-Laporte, P.; Laporte, R. (2015). The EcoNest home: designing and building a light straw clay house. New Society Publishers.

Belanko, J. (2013). El barro, las manos, la casa. Documentario

Belanko, J.E., Natan, P.C. (2019) La casa de barro, técnica: quincha en bastidores ensamblados. Editorial Talleres Trama, Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-86-1367-3

Caballero, A., Guerrero, L. (2021) Experiencias de bioconstrucción: conceptos generales y visiones desde México. Editorial Bonilla, México. ISBN 978-607-8781-63-8

CMHC (2004) Initial material characterization of straw light clay. Canada Mortgage and Housing Corporation Recuperado el 23 de mayo de 2023 de <https://publications.gc.ca/site/eng/476021/publication.html>

Doleman, L. (2017). Essential light straw clay construction: the complete step-by-step guide (Vol. 4). New Society Publishers.

Drozd, W., Kowalik, M.; Harasymiuk, J. (2019). Light clay and straw bale-based building technologies. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 603, No. 2, p. 022033. IOP Publishing.

García Villar, G. (2023). Variabilidad de la adherencia de revoques sobre paneles de tierra alivianada encofrada según distintos tipos de capa de agarre. Informes de la Construcción, 75(571): e507. <https://doi.org/10.3989/ic.6211>

González, H. (2009). Vocabulario técnico de edificación. Morelia, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Arquitectura. ISBN: 9786074240948

González, A. D.; Tognetti, C.; Van den Heede, S. (2011). Beneficios ambientales del uso de paja de cereal para muros en edificios de la Patagonia Andina. *Avance en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 15.

Holzhueter, K.; Itonaga, K. (2017) The potential for light straw clay construction in Japan: an examination of the building method and thermal performance. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 16:1, 209-213, DOI: 10.3130/ jaabe.16.209

IRC (2018) Código de construcción paja arcilla. International Residential Code. <https://codes.iccsafe.org/content/IRC2021P1/appendix-ar-light-straw-clay-construction>

Minke, G. (2013). Manual de construcción con tierra: la tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual. 4ª ed. San Carlos de Bariloche: BRC Ediciones. ISBN: 978-987-24705-2-4

NMX C-416 (2003). Industria de la construcción – Muestro de estructuras térreas y métodos de prueba. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación

Norma E.080 (2017). Diseño y construcción con tierra reforzada. Perú: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Disponible en: <https://www.sencico.gob.pe/descargar.php?idFile=3478>

Romina, O.; Carrillo, O. (2017). Construcción en quincha liviana. Sistemas constructivos sustentables de reinterpretación patrimonial.

Strozs, M.; Sahmenko, G. (2011). Use of straw-clay material in walls. In 3rd international Civil Engineering conference, building materials (Vol. 1, pp. 84-90).

Volhard, F. (2016). Light earth building: A handbook for building with wood and earth. Birkhäuser

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Baja California mi segunda alma mater, a la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología (FCITEC) espacio de trabajo y estudio; por las facilidades para construir los módulos y el experimento de mi investigación. así mismo por el uso de los laboratorios y talleres.

AUTORES

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”.

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”.

Gonzalo Bojórquez Morales. Arquitecto, Maestro en Arquitectura, Doctor en Arquitectura. Investigador Nacional Nivel 1. Arbitro editorial. Profesor Investigador de la Universidad Autónoma de Baja California desde abril de 1998. Asesor de proyectos de licenciatura, maestría y doctorado en 13 Universidades Mexicanas. 35 proyectos de investigación. 175 publicaciones.