



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

Facultad de Arquitectura
Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales

ENTREPISO SEMIPREFABRICADO DE PAJARCILLA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN ARQUITECTURA
En el campo de conocimiento de Tecnologías

PRESENTA:
ARQ. ALAN SOSA CONTRERAS

TUTOR PRINCIPAL

Dr. Alberto Muciño Vélez
Facultad de Arquitectura, UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

Dr. Luis Fernando Guerrero Baca
Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco

Mtro. Tonatiuh Magaña Guzmán
Universidad Autónoma de Baja California

Ciudad Universitaria, CDMX, octubre 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TUTOR PRINCIPAL

Dr. Alberto Muciño Vélez

Experto en materiales y sistemas estructurales

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

Dr. Luis Fernando Guerrero Baca

Investigador referente en arquitectura de tierra

Mtro. Tonatiuh Magaña Guzmán

Diseñador industrial, docente-bioconstructor

MIEMBROS DEL COMITÉ SINODAL

Dra. Ivonne Rosales Chávez

Química especialista en estudio de materiales

Dr. César Armando Guillén Guillén

Académico enfocado en pensamiento científico

APOYO EXTERNO

Mtro. Antonio Tahuitón Mora

Técnico académico del LMSE UNAM

Arq. Alejandra Caballero Cervantes

Arquitecta responsable de Proyecto San Isidro

Humberto Flores Hernández

Maestro constructor en Proyecto San Isidro

Adrián Flores Hernández

Maestro carpintero en Proyecto San Isidro



AGRADECIMIENTOS

Andrea, mi compañera de mudanzas, viajes y “foraneidad”. Gracias por impulsarme a comenzar esto, por hacer más fácil la vida en la CDMX y por las múltiples veces que pude debatir contigo y dar solución a varias etapas de este proyecto.

A mis papás, cuyo apoyo incondicional me ha dado la seguridad de buscar lo que quiero y hacer lo que me gusta. A Kathy, de quien siempre tuve un ejemplo a seguir y fue mi primera maestra.

Al Dr. Muciño por su guía, cuestionamientos, apertura y disposición para llegar al objetivo planteado. Al Dr. Luis Fernando, por siempre compartir su tiempo y conocimiento, así como motivarme durante esta investigación. Al Mtro. Tonatiuh Magaña, por sus consejos y asesorías relacionadas a la prefabricación y puesta en obra. A la Dra. Ivonne y el Dr. Guillén por su impulso, pasión y diversas charlas en torno a la tierra.

Al Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales (LMSE) de la Facultad de Arquitectura, que fue mi segunda casa durante estos 2 años y donde descubrí el gusto por la investigación. Al Mtro. Tahuitón que estuvo en todas y cada una de las pruebas, por su orientación y dedicación. También a quienes conocí en el LMSE, que sin duda fueron más que compañeros de laboratorio: Héctor, Cassandra, Marlene, Andrés y Hermain.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, que siempre fue mi sueño estudiar en esta institución y cuyos principios permearon en mí. Al Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura y a la Facultad de Arquitectura.

Al Proyecto San Isidro por el aprendizaje sobre bioconstrucción, el apoyo desde el inicio de este proyecto y la confianza para llevarlo a escala real. Especialmente a la arquitecta Alejandra Caballero Cervantes, al maestro “Güero”, al maestro Adrián y a Paco.

A la familia Aragón Guevara, cuyo apoyo fue fundamental para este periodo, especialmente con los traslados largos en coche y mis traslados en bici dentro de Ciudad Universitaria.

Esta investigación no podría haberse llevado a cabo sin el apoyo del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAH-CYT) así como el Programa de Apoyo a Estudiantes de Posgrado (PAEP) de la UNAM.

ÍNDICE

1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
1.1 RESUMEN	9
1.2 INTRODUCCIÓN.....	10
1.3 ANTECEDENTES.....	11
1.3.1 Arquitectura de tierra en México.....	11
1.3.2 Incompatibilidad con industrializados.....	15
1.3.3 Entrepiso de pajarcilla (método tradicional)	16
1.4 ORIGEN DE LA INVESTIGACIÓN	18
1.4.1 Problemática inicial.....	18
1.4.2 Obtención de datos sobre el desempeño mecánico	19
1.4.3 Normativas y procesos de prueba para su evaluación.....	20
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	21
1.5.1 Prefabricación para agilizar procesos	21
1.5.2 Datos sobre desempeño mecánico.....	21
1.5.3 Aplicación ante omisión de normativa	22
1.6 HIPÓTESIS	22
1.7 OBJETIVOS	22
1.7.1 Objetivo general	22
1.7.2 Objetivos Particulares.....	22
2. MARCO REFERENCIAL-CONCEPTUAL.....	23
2.1 TÉCNICA CONSTRUCTIVA	24
2.1.1 Tierra Aligerada/Pajarcilla.....	24
2.1.2 Aplicación en húmedo.....	25
2.1.3 Aplicación en seco.....	27
2.2 TIERRA EN SISTEMAS HORIZONTALES	29
2.2.1 Tierra como estructura.....	29
2.2.2 Tierra en superficie	29
2.2.3 Tierra en relleno	29
2.3 PREFABRICACIÓN EN ARQUITECTURA DE TIERRA.....	31
2.3.1 Adobillo.....	31
2.3.2 Machimbloque.....	31

2.3.3 Hourdi Blocks.....	32
2.3.4 Tapial prefabricado	33
2.3.5 Swallow brick	34
2.4 OTROS DESARROLLOS EN CUBIERTAS.....	35
2.4.1 Domotej	35
2.4.2 Sugarcrete	36
3. MARCO TEORICO.....	37
3.1 PAJARCILLA.....	38
3.1.1 La barbotina.....	38
3.1.2 Preparación de los componentes	39
3.1.3 Diseño de mezcla	40
3.2 PIEZA PREFABRICADA	41
3.2.1 Limitantes del diseño.....	41
3.2.2 Resistencia por forma	41
3.3 ENTREPISOS.....	42
3.3.1 Criterios estructurales para entrepisos.....	42
3.3.2 Influencia del peso en la estructura	44
4. MATERIALES.....	46
4.1 MADERA	47
4.1.1 Estructura.....	47
4.2 TIERRA.....	48
4.2.1 Definiciones.....	48
4.2.2 Composición.....	50
4.2.3 Clasificaciones.....	51
4.3 ESTABILIZANTES.....	52
4.3.1 Fibras	54
4.3.2 Estabilizantes.....	55
5. ESTRATEGIA DE TRABAJO.....	57
5.1 TIERRA.....	60
5.1.1 Preparación.....	61
5.1.2 Clasificación preliminar	62
5.1.3 Composición.....	63
5.1.4 Consistencia	65

5.1.5 Contracción.....	66
5.1.6 Cohesión	66
5.2 MEZCLA	67
5.2.1 Variables por tipo de estabilización.....	69
5.2.2 Evaluación a flexión	71
5.2.3 Evaluación a compresión.....	72
5.3 PIEZA PREFABRICADA.....	73
5.3.1 Diseño de pieza y molde.....	73
5.3.2 Evaluación de pieza prefabricada.....	74
5.3.3 Evaluación del refuerzo interior	75
5.4 SISTEMA	75
5.4.1 NTC Normativa	75
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	78
6.1 CARACTERIZACIÓN DE LA TIERRA	79
6.1.1 Preparación.....	79
6.1.2 Clasificación preliminar	80
6.1.3 Composición.....	81
6.1.4 Consistencia	85
6.1.5 Contracción.....	87
6.1.6 Cohesión	88
6.1.7 Identificación final	88
6.2 EVALUACIÓN DE VARIABLES A FLEXIÓN.....	90
6.2.1 Estabilización física y mecánica (compactación y densidad).....	91
6.2.2 Estabilización por armazón (longitud de fibra).....	94
6.2.3 Estabilización química (mucílago de nopal y pasta de cal)	97
6.2.4 Estabilización homogénea (tipo de tierra)	99
6.3 EVALUACIÓN DE VARIABLES A COMPRESIÓN	101
6.3.1 Estabilización física (densidad).....	102
6.3.2 Estabilización química (mucílago de nopal y pasta de cal)	104
6.3.3 Estabilización homogénea (tipo de tierra)	106
6.4 EVALUACIÓN DE LA PIEZA	108
6.4.1 Evaluación por desplazamiento.....	109
6.4.2 Evaluación por carga (kg/min)	113

6.4.3 Evaluación del refuerzo	115
6.5 SISTEMA	116
6.5.1 Validación por correlación	116
6.5.2 Aplicación constructiva.....	118
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
7.1 Caracterización de tierras	121
7.2 Evaluación de la pajarcilla a flexión	121
7.3 Evaluación de la pajarcilla a compresión	122
7.4 Evaluación de la pieza prefabricada	122
7.5 Evaluación del sistema	123
7.6 Generales.....	123
ÍNDICE DE FIGURAS	125
ÍNDICE DE GRÁFICAS	131
ÍNDICE DE TABLAS	134
GLOSARIO DE TÉRMINOS	136
BIBLIOGRAFÍA	137
ANEXO 1: Manual de pruebas para determinar el tipo de tierra	144
ANEXO 2: Hoja de producto.....	149
ANEXO 3: Cuadro de rendimientos	150



1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 RESUMEN

La **pajarcilla**, como técnica de construcción con tierra para entrepisos, consta de una **estructura de madera** entre las que se compacta una mezcla de tierra semilíquida (barbotina) y paja, lo que le brinda **aislación térmica y acústica**. Esta investigación busca **optimizar el proceso constructivo**, reducir el **desgaste energético** que esta técnica representa a los trabajadores, además de obtener un mayor **control en el desempeño mecánico** del sistema.

Sin embargo, la pajarcilla **carece de métodos de evaluación mecánica**, lo que provoca desconocimiento o en su defecto, una disparidad en los resultados reportados respecto a sus propiedades constructivas. Ante esta situación, se tomaron como referencia procedimientos y métodos de prueba enfocados en la evaluación de otros materiales, con el objetivo de obtener los datos mecánicos de la pajarcilla y posteriormente **determinar si la propuesta cumple con las demandas estructurales establecidas para entrepisos en la normativa mexicana**.

En un **proceso analítico-consecuente**, se partió de una mezcla base obtenida de la literatura. Posteriormente se evaluaron a **flexión 17 mezclas** con variables divididas en cinco series por tipo de estabilización: (1) física, (2) mecánica, (3) por armazón, (4) química y (5) homogénea. Después se evaluaron a **compresión 8 mezclas** en 3 series: (1) física, (2) química y (3) homogénea. Se analizó la influencia de los componentes y tipo de estabilización en la **respuesta mecánica de la pajarcilla**, seleccionando por cada evaluación, la mezcla de mayor resistencia como base para las pruebas subsecuentes.

A flexión, **después del tipo de tierra**, la variable con mayor influencia es la **longitud de la fibra (10-15 cm)** de la estabilización por armazón, mientras a compresión, **la densidad (1000 kg/m³)** de la estabilización física, tuvo mayor impacto. Se logró un **aumento**, desde la mezcla base hasta la de mayor desempeño mecánico, del **62.82%** en la resistencia a **flexión** y del **181.62%** a **compresión**. Se concluye que la caracterización de la tierra juega un papel primordial y se hace evidente la **evaluación particular de la pajarcilla**, sin estandarizar la técnica, derivado de la influencia de sus componentes.

Con la evaluación de **probetas a flexión** de la 1ra etapa, se definió la mezcla a utilizar en las **piezas prefabricadas** y sirvió como referente para ir modificando y estableciendo el **diseño del sistema** junto con el análisis histórico. Ante la falta de registros sobre la resistencia de la pajarcilla en entrepiso, se realizaron **pruebas mecánicas a las piezas**. Éstas se analizaron a partir de la norma NMX-C-463-ON-NCCE, que evalúa las bovedillas empleadas en sistemas convencionales de edifica-

ción. Luego se propuso un **método de evaluación-validación** de las piezas prefabricadas y, por tanto, del sistema de entrepiso. Todas las piezas **resistieron por encima de los 125kgf** solicitados en la normativa, indiferentemente del tipo de tierra, pero estos **resultados cambian** cuando las pruebas se realizan **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 concluye que **una vez que se cumple con la carga** requerida por la norma, tanto las piezas prefabricadas como el entrepiso, **pueden ser implementados en la construcción contemporánea**.

1.2 INTRODUCCIÓN

El capítulo 1 expone la **arquitectura de tierra** en el territorio mexicano, desde la época prehispánica, hasta la actualidad. Aborda la incompatibilidad de los elementos de concreto armado con las construcciones con tierra y presenta la **técnica tradicional de construcción de entrepiso de pajarcilla**, a partir de la cual se propone la prefabricación.

Posteriormente, el **origen de la investigación** se centra en el desgaste energético y de material que representa la construcción del entrepiso de pajarcilla. A esta problemática inicial se le añaden: la necesidad de **conocer el desempeño mecánico del material**, así como establecer métodos de prueba para dicho fin. Por lo tanto, la justificación se centra en estas 3 problemáticas: la prefabricación, obtención de datos mecánicos y pruebas **a partir de normativas de referencia**. Por último, se presenta la hipótesis de la investigación para la cual se establece un objetivo principal guiado de 7 particulares.

El capítulo 2 se centra en definir la **pajarcilla** o tierra aligerada, así como las distintas aplicaciones de esta en la construcción con tierra. De igual forma se presentan diversas soluciones de **cubiertas planas o entrepisos** donde se utiliza la tierra y la función de esta en el sistema. La **prefabricación con tierra**, así como otros desarrollos de cubiertas con materiales naturales cierran el marco de referencia.

La parte teórica se encuentra en el capítulo 3, se plantean las **limitantes de la pajarcilla**, de la pieza prefabricada, así como las teorías del diseño por forma, el funcionamiento de los entrepisos y la influencia de estos en las estructuras de tierra. Los materiales estudiados se definen en el capítulo 4, comenzando por la estructura de **madera** y la normas que la rigen en México, las clasificaciones de la **tierra** desde diversas áreas y se establecen los **agregados** a utilizar.

El **proceso experimental** se presenta en el quinto capítulo, que va desde la

caracterización de la tierra, la definición y prueba de las mezclas a flexión y compresión, las pruebas a la pieza prefabricada y por último la validación del sistema. Los **resultados** junto con su análisis se encuentran en el penúltimo capítulo y se concluye el trabajo con las **conclusiones y recomendaciones** producto del proyecto de investigación. Aunado a esto se anexa el manual desarrollado y utilizado para la caracterización de la tierra, así como la hoja del producto.

1.3 ANTECEDENTES

1.3.1 Arquitectura de tierra en México

Prehispánica

El **territorio mexicano**, como la gran parte de los países latinoamericanos, cuenta con una tradición constructiva donde la **tierra era el material protagonista** de sus arquitecturas. Esto se confirma gracias a las construcciones que hoy en día persisten, como las zonas arqueológicas de Teotihuacan, Cacaxtla y Cholula, entre muchas otras evidencias que se pueden encontrar repartidas por toda la república. Desde la cultura madre, la arquitectura de los olmecas se desarrolló en torno a la tierra, aunque la atención de este material se ha centrado en su uso como barro para cerámica.

Los registros más antiguos en torno a las pirámides se tratan de **prototipos de tierra** en la zona baja del Pacífico, Istmo y Golfo. Para el Preclásico ya se cuenta con **pirámides de tierra** de entre 10 y 15 metros. Pese a que la mayoría de estos sitios son abandonados, la tradición constructiva continúa y se expande, dando como resultado núcleos monumentales como Tikal, Calakmul, Tres Zapotes, Cuicuilco, Totimehuacan o Cantona¹. Desde esa época aparecen los **juegos de pelota** que se realizaban en canchas de tierra, que fueron recubiertas con piedra para el preclásico medio. También se encuentran ejemplos excepcionales como la cancha de tierra apisonada de Teopantecuntitlán².

Si bien las construcciones monumentales, a partir de cierta etapa, comenzaron a ser **protegidas con piedra**, el cuerpo y/o estructura de éstas es de tierra³, y es quizás ese recubrimiento el que “oculta” su protagonismo en Mesoamérica y dificulta la vinculación de la tierra como **material de construcción de las culturas prehispánicas**.

La realidad es que, incluso en zonas donde se cuenta con piedra disponible

1 Daneels Annick, “La construcción de tierra ¿El prototipo de la arquitectura mesoamericana?”, en *Arquitectura Mesoamericana de Tierra I*, ed. Annick Dannels, 1ra edición, vol. 1 (Ciudad de México: Instituto de Investigaciones Antropológicas. Universidad Nacional Autónoma de México, 2020), 25–37.

2 Daneels Annick.

3 Daneels Annick, “Introducción”, en *Arquitectura Mesoamericana de Tierra I*, ed. Annick Dannels, 1ra edición, vol. 1 (Ciudad de México: Instituto de Investigaciones Antropológicas. Universidad Nacional Autónoma de México, 2020), 11–23.

para la edificación y se llegó a desarrollar una arquitectura de piedra, se optó por continuar construyendo ciertos **edificios con tierra**. Annick Daneels⁴ postula que “se debe al **prestigio y valor simbólico** de este material”. En algunos casos, la elección de la tierra para construcción responde a un sentido más simbólico. Ejemplo de esto es el primer acto fundacional en Tenochtitlán por parte de los aztecas, que consistió en la erección de un altar de tierra o **tlalmomoxtli**⁵.

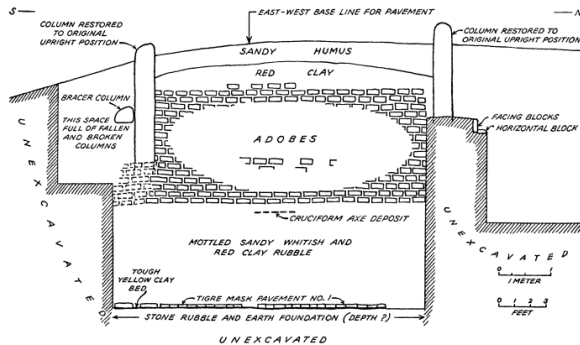


Fig 1 Interior de estructura piramidal en la Venta, Tabasco. Tomado de Drucker, 1952.

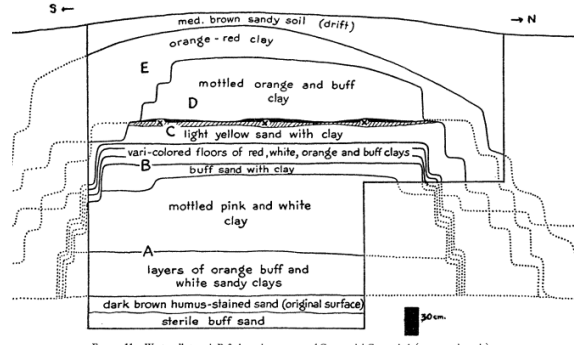


Fig 2 Interior de estructura prehispánica. Tomado de Drucker, 1952.

El **prototipo de la arquitectura mesoamericana** es de tierra y se puede entender como la tradición principal de la época prehispánica, lo que le da el carácter de “expresión plenamente mesoamericana”⁶. La idea del uso de la tierra por conformismo más que por **convicción** resulta errónea, ya que, para la mayor parte de las civilizaciones prehispánicas, este **material era el más apropiado** por la disponibilidad y que, además, brindaba comodidad bioclimática al interior por las características de la tierra⁷.

Así como se utilizó en construcciones civiles, la tierra fue utilizada para la **arquitectura doméstica** y México destaca por la **diversidad de técnicas** empleadas en torno a la construcción con tierra, que abarcan: la tierra compactada, el barro modelado, el bajareque y el adobe⁸. Si bien, en épocas más recientes el adobe se utilizó para viviendas, en las épocas más tempranas, se registra su uso únicamente en edificios mayores o residencias de las elites, lo que sugiere una **especialización en la construcción**. Para las viviendas se utilizaban otras técnicas como el bajareque o la tierra modelada⁹.

Los conocimientos constructivos con tierra se dieron a través de largos periodos y **transmisión de conocimientos** por generación, esto permitió el desarrollo

4 Daneels Annick, “La construcción de tierra ¿El prototipo de la arquitectura mesoamericana?”

5 Daneels Annick.

6 Daneels Annick.

7 Luis Fernando Guerrero Baca, “Sistemas constructivos, medio ambiente y preservación del patrimonio arqueológico de tierra”, en *Arquitectura Mesoamericana de Tierra I*, ed. Annick Daneels, 1ra edición, vol. 1 (Ciudad de México: Instituto de Investigaciones Antropológicas. Universidad Nacional Autónoma de México, 2020), 415–33.

8 Luis Fernando Guerrero Baca.

9 Daneels Annick, “Introducción”.

de nuevos sistemas constructivos¹⁰ como “concreto teotihuacano” o el “adobe olmeca”. También se llegó a una técnica de construcción tan avanzada que impresionó a los españoles a su llegada a Tenochtitlan, donde existían **distintos tipos de vivienda** de acuerdo con el rango socioeconómico de los habitantes, las cuales iban desde **ramas, tierra y paja**, donde nuevamente, la técnica más utilizada era el adobe¹¹.

Colonia

Con la llegada de los europeos a tierras americanas, comienza la **mezcla e intercambio de técnicas constructivas**, se tecnifica la tapia y se retoma el adobe. Las órdenes mendicantes como los franciscanos y los jesuitas hicieron uso de **la mano de obra y técnica de los indígenas** para construir los edificios de la Nueva España. De esta forma, la arquitectura civil y el clero secular se desarrolló gracias a la construcción con tierra¹².

Durante la ocupación española, la arquitectura de tierra se favoreció del material americano, así como de la diversidad de maderas que se podían encontrar. Los muros de las viviendas para los españoles comenzaron a ejecutarse con la **tapia francesa** y se cubrían con **entramados** de ramas o cañas, embarrada con una mezcla de tierra, agua y paja. Posteriormente, la tapia francesa fue remplazada por la tapia ordinaria y el **adobe** mantuvo su carácter de técnica principal en el México colonial¹³.

Siglo XIX

Las **costumbres constructivas** no cambiaron mucho al inicio del México independiente, la tapia introducida junto con muchas otras influencias arquitectónicas provenientes de Francia, y utilizada para la erección de haciendas y algunos templos, se seguía utilizando para realizar bardas de los predios, así como para los **muros**



Fig 3 Sahkalli o jocal con techo de zacate. Tomado de “Arquitectura en el código Florentino” de Rodríguez A. y Valillas L. s/f.

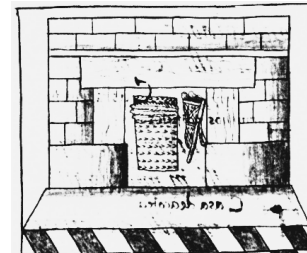


Fig 4 Pochtekakalli o casa de comerciantes. Tomado de Rodríguez A. y Valillas L. s/f.

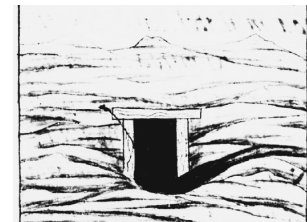


Fig 5 Tlallankalli o casa entre la tierra. Tomado de Rodríguez A. y Valillas L. s/f.



Fig 6 Santuario de muros de adobe en San Pablo Villa de Mitla. Fotografía del autor.

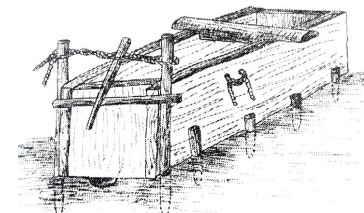


Fig 7 Tapia francesa adaptada y usada en México. Tomado de Hernández, 2002.

10 Luis Fernando Guerrero Baca, “Sistemas constructivos, medio ambiente y preservación del patrimonio arqueológico de tierra”.

11 Secretaría de asentamientos humanos y obras públicas, “Los que saben son los que la viven”, *Suplemento. Las casas de los mexicanos* (Distrito Federal, 1980).

12 Francisco J. Pérez de Salazar Vera, “Tecnologías de la arquitectura con tierra sin conocimiento” (Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, 1989).

13 Rubén Osvaldo Chiappero y María Clara Supisiche, “Arquitecturas de tierra”, en *Arquitectura en tierra cruda* (Argentina: Nabuko, 2003).

perimetrales de las viviendas, mientras que, al interior, los muros eran de adobe¹⁴. Poco a poco, el adobe volvió a ganar terreno frente a la tapia, por ser una técnica más económica. Posteriormente la tierra pasó de ser material para construir a ser usado para **asentar los ladrillos cocidos**, que comenzaban a aparecer por esta época¹⁵.



Fig 8 Barda de predio hecha con adobe en Atltzayanca, Fotografía del autor.



Fig 9 Interior de muro de adobe recubierto de piedra en Puebla. Fotografía del autor.



Fig 10 Barda de adobe con contrafuerte de tabique en Patzcuaro. Fotografía del autor.

Siglo XX

El adobe terminó por ser **reemplazado por el ladrillo**, inicialmente en las obras civiles, mientras que la arquitectura doméstica continuaba con los mismos materiales. Para las primeras décadas del siglo XX los ladrillos cocidos junto con la mezcla de **cal-arena** estaban en todo tipo de construcciones, dejando de lado a la arquitectura de tierra¹⁶.

Con la aparición de los **sistemas industrializados**, construir con tierra fue resentido como algo anacrónico y se comenzó a asociar a la tierra como un **material meramente rural**. Mientras en América se olvidaban de la tierra, en Europa se retomaba para reconstruir sus ciudades tras la Segunda Guerra Mundial. La época de escasez que precedió las guerras incitó a los arquitectos e ingenieros a aprovechar al máximo los **recursos locales**, tomando como ejemplo las prácticas antiguas de construcción con tierra¹⁷.

Sería un error decir que la arquitectura de tierra desapareció por completo. A finales del siglo XX se reconocía que no todas las viviendas estaban construidas de materiales industrializados y que las diversas **soluciones para vivienda** respondían a la **disponibilidad de materiales y al grado de desarrollo económico**. Es así como la Secretaría de asentamientos humanos y obras públicas menciona que las casas, en entornos rurales mayormente, continúan siendo de adobe, bajareque, tierra apisonada, tepetate y terrados¹⁸.

A nivel iberoamericano se comenzaron a desarrollar redes de **investigación sobre la arquitectura de tierra**, desde la visión arqueológica y contemporánea,

14 Luis Fernando Guerrero Baca, "Pasado y porvenir de la arquitectura de tapia", *Bitácora arquitectura*, núm. 22 (el 6 de junio de 2011): 6, <https://doi.org/10.22201/fa.14058901p.2011.22.25519>.

15 Chiappero y Supisiche, "Arquitecturas de tierra".

16 Chiappero y Supisiche.

17 Pérez de Salazar Vereá, "Tecnologías de la arquitectura con tierra sin conocimiento".

18 Secretaría de asentamientos humanos y obras públicas, "Los que saben son los que la viven".

ejemplo de esto son los Seminarios Iberoamericanos de Arquitectura y Construcción con Tierra, impulsados por la Red Iberoamericana desde 1995. Ese mismo año a nivel nacional el Instituto Nacional de Antropología e Historia creó el Seminario Internacional de Conservación y Restauración de Arquitectura de Tierra¹⁹.



Fig 11 Casa de adobe en Tlaxco. Fotografía del autor.



Fig 12 Vivienda de 2 niveles hecha de adobe con recubrimiento de cal-arena en Morelia. Fotografía del autor.



Fig 13 Casa de adobe en San Pablo Villa de Mitla. Fotografía del autor.

Actualidad

Gran parte de la arquitectura de tierra se ha visto afectada por **intervenciones y recubrimientos** con materiales industrializados como el concreto y el acero, en parte por la **pérdida de la tradición constructiva** y con ella el conocimiento sobre esta²⁰. La inadaptabilidad de las formas de habitar con los materiales industrializados, aunado a la posibilidad económica orillan a los países a la búsqueda de soluciones alternativas a partir de materiales y técnicas locales, por esta razón, las investigaciones en torno a la arquitectura sirven como una reactualización de las técnicas de construcción antiguas²¹.

Las formas en que se construía antes proporcionaban la **tecnología adecuada** para aprovechar los recursos naturales de acuerdo con las condiciones del ambiente, en este sentido deben **encaminarse las nuevas técnicas**. Actualmente, ya no es suficiente utilizar los recursos como se encuentran en la naturaleza, las nuevas técnicas deben lograr materiales de construcción que **duren más** y que sean **más fáciles de utilizar**²². “Estos cambios no deben hacerse sino poco a poco, ya que no es válido que para mejorar se cambie violentamente las formas de construcción, así como no sería posible cambiar bruscamente una cultura”²³.

1.3.2 Incompatibilidad con industrializados

Si bien, el cemento y por tanto el concreto tienen cualidades únicas, es importante remarcar su **incompatibilidad con la arquitectura de tierra**, esto en pro de

19 Daneels Annick, “Introducción”.

20 Esmeralda Ávila Boyas y Luis Fernando Guerreo Baca, “El mucílago de opuntia ficus como estabilizante en recubrimientos de tierra”, *Memorias 18 SIACOT “Tierra, cultura, hábitat resiliente y desarrollo sostenible”*, octubre de 2018, 115–26.

21 Pérez de Salazar Vera, “Tecnologías de la arquitectura con tierra sin conocimiento”.

22 Secretaría de asentamientos humanos y obras públicas, “Los que saben son los que la viven”.

23 Secretaría de asentamientos humanos y obras públicas.

que cada material cumpla su objetivo y no afecte la integridad de los inmuebles²⁴. Lo anterior se ha corroborado a partir de intervenciones estructurales en edificaciones históricas hechas de tierra, donde al introducir columnas y vigas de concreto armado o acero, se **debilita la edificación y aumenta el riesgo de colapso** ante actividad sísmica²⁵. Lo mismo sucedió con la incorporación de marcos rígidos de concreto en los inmuebles afectados por los sismos, donde por desconocimiento del comportamiento estructural de la tierra, se agravó la situación, generando rupturas y disgregaciones²⁶.



Fig 14 Daños en viviendas de tierra tras el sismo del 2017. Se observan intervenciones y losas de concreto. Tomado de Zatarain, 2017. Fotografía de Onnis Luque.



Fig 15 Desprendimientos de recubrimientos de cemento y daños en muros de adobe. Tomado de Sánchez, 2021. Fotografía de Sánchez, 2018.

Las vigas de concreto armado se han utilizado en la construcción con tierra buscando el mismo amarre que se ha logrado con las vigas de madera. Sin embargo, este tipo de **“estabilización estructural”** resulta más rígido y un elemento demasiado rígido puede causar daño a los muros portantes debido al golpeteo vertical durante un sismo. Las **diferencias de rigidez** entre las técnicas de construcción con tierra y el concreto puede provocar fallas en las uniones o transiciones entre los elementos²⁷. Por lo tanto, colocar vigas o diafragmas rígidos de concreto en la construcción con tierra no es aconsejable como intervención en una construcción ni como propuesta en una edificación nueva.

1.3.3 Entrepiso de pajarcilla (método tradicional)

El caso más cercano a lo planteado en este proyecto, y a partir del cual sur-

24 Minerva Rodríguez Licea y Luis Fernando Guerrero Baca, “Impacto en los muros de adobe por el uso de recubrimientos con cemento en el occidente de México”, *Memorias 19 SIACOT “Conservación sostenible el paisaje: tierra y agua”*, octubre de 2019, 456–68.

25 Sofia Rodríguez Larraín et al., “Aportes de la enseñanza de la arquitectura en tierra a la mitigación de riesgos”, diciembre de 2013.

26 Minerva Rodríguez Licea, Edmundo Arturo Figueroa Viruega, y Miguel Fernando Elizondo Mata, “El estado de conservación de la arquitectura de tierra en la ciudad de Colima, México”, *XIV Foro académico. Diálogos: las voces del patrimonio cultural*, noviembre de 2017.

27 Tim LG Michiels y Carina Fonseca Ferreira, “Técnicas de estabilización sismorresistente para mejorar el comportamiento estructural de edificios históricos de tierra”, *Memorias 13 SIACOT “Material universal, realidades locales”*, agosto de 2013, 31–46.

gió la idea de prefabricación, es el **entrepiso de pajarcilla del Proyecto San Isidro (PSI)**, ubicado en Tlaxco Tlaxcala. Donde a partir de consultar literatura diversa y la recopilación de experiencias en distintos cursos, la arquitecta Alejandra Caballero Cervantes comenzó a replicar este sistema utilizado en algunas zonas de Francia y Alemania.

La pajarcilla es una técnica **similar al bajareque**, con la diferencia de que se requiere apisonar dentro de una cimbra temporal. Para su elaboración se debe esparcir la **paja** en una lona y se debe ir humedeciendo con la **barbotina** (tierra en estado semilíquido). Ambos materiales se deben mezclar hasta obtener una mezcla lo suficientemente **seca para ser compactada**, pero con la cantidad de barbotina necesaria para aglutinar la paja²⁸.

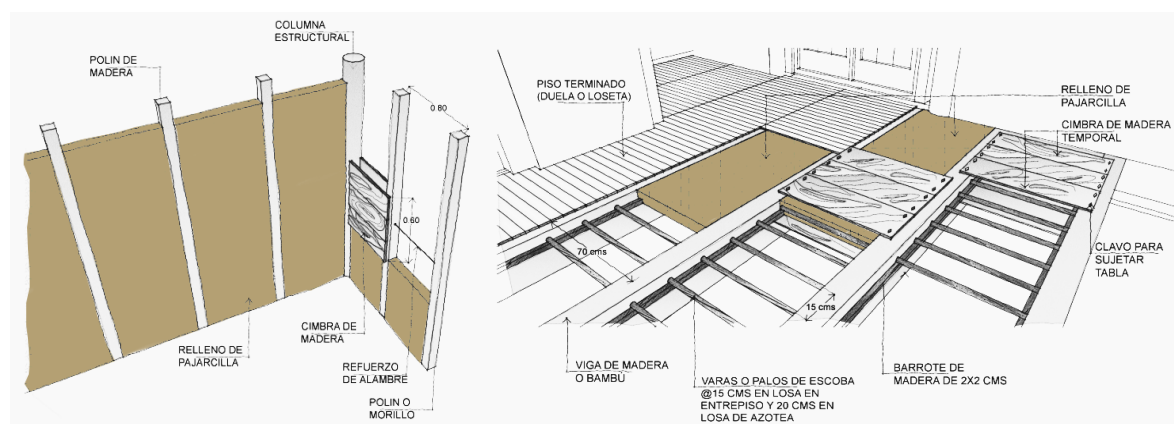


Fig 16,17 Diagrama constructivo de pajarcilla en muro y pajarcilla en entrepiso. Tomado del manual "Notas sobre bioconstrucción" de Caballero, 2021.

Se utiliza tanto para **muros de relleno** como en **entrepisos**, para el caso de querer utilizarse en entrepisos o cubiertas se debe tomar en cuenta que la **compactación** debe realizarse de forma horizontal **entre las vigas o morillos** de la estructura principal, además de las especificaciones de la cimbra, de acuerdo con las características de cada proyecto. Esta cimbra consta de dos partes: la **cimbra inferior**, cuya longitud es del largo del claro y que se mantendrá fija durante la ejecución; y la **cimbra superior**, que sirve como tapa y que consta de tablas de 20 cm de ancho, las cuales se irán clavando y desclavando conforme se avanza en la fabricación²⁹.

Otra diferencia es el **refuerzo interior**, que es diferente al que se ocupa en los muros de pajarcilla. Para los entrepisos, se tiene una estructura formada por **rieles de madera** de perfil cuadrado, los cuales van clavados a la mitad del peralte de las vigas. Estos rieles sirven de base para los refuerzos transversales, que son **palos de escoba o varas**, cortados a la medida entre vigas y colocados al interior cada 15 cm conforme se va compactando la mezcla³⁰.

28 Alejandra Caballero Cervantes y Luis Fernando Guerrero Baca, "Entramados", en *Experiencias de bioconstrucción: conceptos generales y visiones desde México*, 1ra edición (Ciudad de México: Bonilla Artigas, 2021), 87–97.

29 Caballero Cervantes y Guerrero Baca.

30 Caballero Cervantes y Guerrero Baca.

1.4 ORIGEN DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Problemática inicial

Derivado de la observación y de los comentarios con la arquitecta Alejandra Caballero y los maestros albañiles³¹, se encontró que es una técnica que ha dado buenos resultados debido a su **bajo costo económico y ambiental**. Sin embargo, el proceso de fabricación puede resultar **tedioso y cansado** ya que los trabajadores deben permanecer en una posición encorvada mientras van comprimiendo la mezcla al interior de la cimbra. Aunado a lo anterior, solamente se utiliza la pajarcilla como **relleno y aislante**, sin brindarle una capacidad portante, por lo que los esfuerzos recaen únicamente en la estructura de madera³².

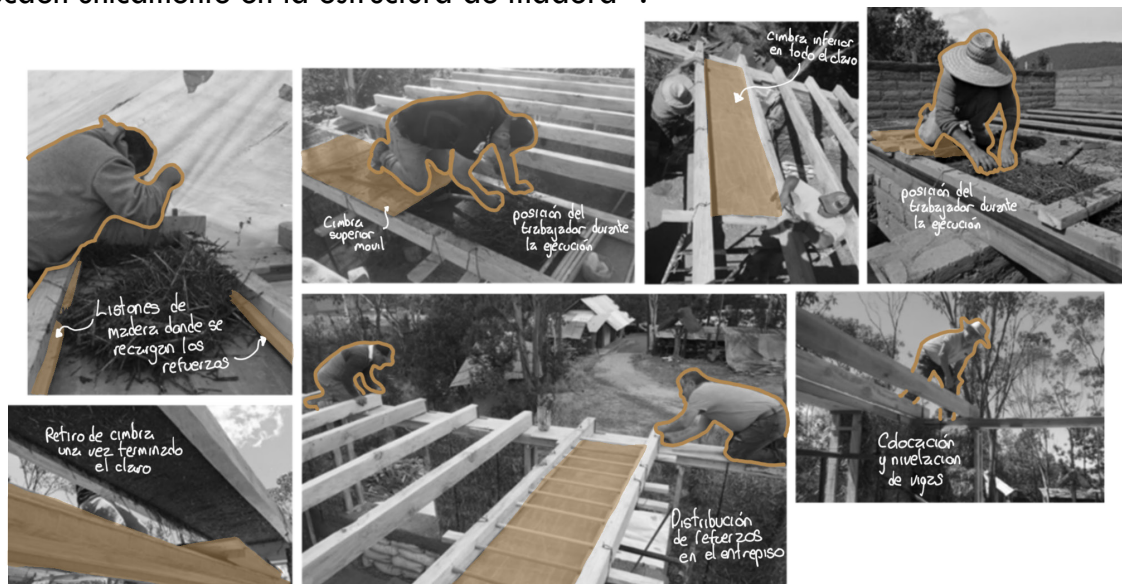


Fig 18 Proceso constructivo del entrepiso de pajarcilla tradicional. Fotografías tomadas por el autor en Proyecto San Isidro.

Con esto se establece que el esfuerzo que requiere su construcción no corresponde con las ventajas que brinda y que se le podría otorgar una respuesta mecánica a la pajarcilla para que trabaje en conjunto con la estructura principal. Es así como la investigación se centra en **reducir el desgaste energético** de los trabajadores y **determinar el comportamiento mecánico** de la pajarcilla.

Como respuesta inicial, se postuló la **prefabricación** de piezas tipo bovedillas de pajarcilla, que permitieran a los trabajadores realizar la mayor parte del proceso a nivel de suelo en una posición más cómoda. Esto también impactaría en los **tiempos de construcción y reducción de material**, ya que durante la etapa de secado de las piezas se pueden llevar otras actividades como el levantamiento de los muros y colocación de las vigas de madera. Mientras que, una respuesta mecánica favorable con la pajarcilla permitiría omitir el enduelado superior de madera o en su defecto, sustituirlo con una **capa de compresión** de la misma pajarcilla.

31 Alejandra Caballero Cervantes, Humberto Hernández Flores, y Alan Sosa Contreras, "Proceso constructivo de pajarcilla para entrepisos" (el 22 de abril de 2022).

32 Alejandra Caballero Cervantes, "Notas sobre bioconstrucción" (Tlaxco, Tlaxcala, s/f).

1.4.2 Obtención de datos sobre el desempeño mecánico

Por tanto, se planteó la necesidad de obtener información sobre la **resistencia del material** para estar sometido a cargas externas. El análisis histórico mostró que si bien existen muchas técnicas donde se utiliza la **tierra en entrepisos**, a este material únicamente se le confiere capacidad aislante, tanto térmica como acústica, mientras que la literatura menciona que los paneles o piezas de tierra **no deben ser sometidos a cargas vivas**, y únicamente deben soportar su propio peso³³.

Aunque **diversas investigaciones** se han enfocado al estudio de las técnicas de construcción con tierra, en principio se realizaban desde la **perspectiva histórica**, y cuando se analiza el material lo hacen sobre sus **características térmicas**. Dentro de las que estudian la parte mecánica, la mayoría se enfoca en **pruebas a compresión**, a otras técnicas distintas a la pajarcilla como el adobe, bloques de tierra comprimida y bastidores de bajareque, cuya aplicación futura es en muros.

Como cada investigación estudia la tierra de determinada región y por tanto con características específicas, resultaría **erróneo tomar los resultados de otros estudios** como absolutos o válidos para la propuesta. Desde la elección de la tierra a utilizar se comienza a condicionar su desempeño, adicionalmente a su proceso de elaboración y los agregados que se vayan seleccionando. Los factores antes mencionados **complejizan la búsqueda y obtención bibliográfica** de las resistencias a compresión, flexión y demás características mecánicas. Por tanto, se requiere obtener dicha información a través de **evaluaciones y pruebas** como cualquier otro material constructivo.

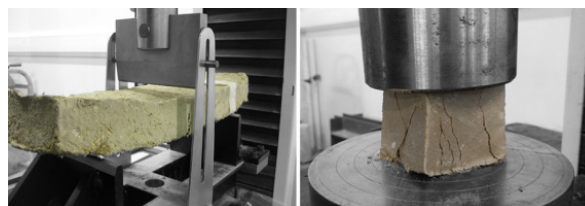


Fig 19 Pruebas a flexión y compresión en adobes con paja y acerrín. Tomado de Costi, Ioannou y Philokyprou, 2021.

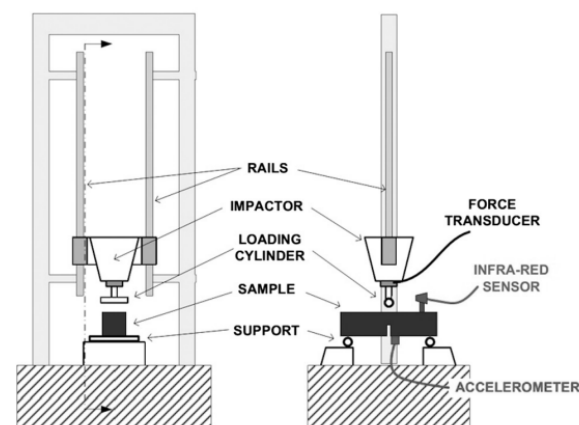


Fig 20 Esquema para pruebas de impacto a flexión y compresión. Tomado de Aymerich, Fenu, Francesconi et al. 2016.

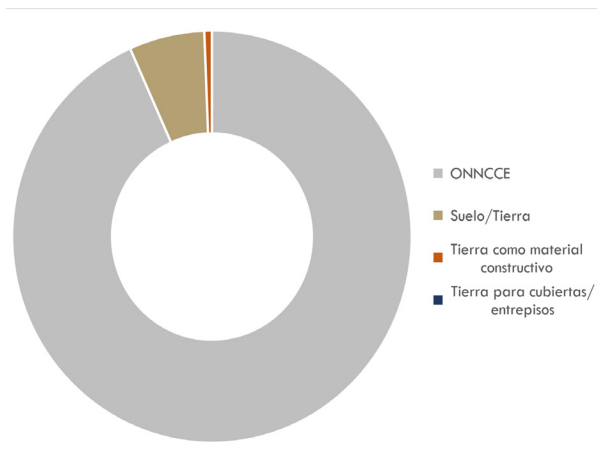


Fig 21 Pruebas a compresión y flexión de tierra aligerada. Tomado de Giarreton, Dizhur y Morriset, 2021.

33 Franz Volhard, "Light Earth Panels", en *Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth*, English (Basel: Birkhäuser, 2016), 135–36.

1.4.3 Normativas y procesos de prueba para su evaluación

No obstante, el uso de tierra como material de construcción se enfrenta a **problemas de regulación** en cuanto a su aplicación y métodos de prueba. En las normativas de construcción mexicana únicamente se menciona a la tierra para hacer referencia al **material granulométrico dispuesto en el suelo** donde se desplantará la construcción, y en ningún punto se menciona como material constructivo³⁴. De alrededor de 300 normativas del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE)³⁵, únicamente 20 normas están enfocadas al análisis del suelo. Mientras que, para la **tierra como material constructivo**, solamente se cuenta con la NMX-C-508-ONNCCE-2014 que dicta los procesos de evaluación para los Bloques de Tierra Compactada estabilizados con cal.



Gra 1 Cantidad total de normativas en la ONNCCE en comparación con las que están enfocadas al suelo y la tierra como material constructivo. Elaboración propia a partir de ONNCCE, 2023.

Por no contemplar a la tierra como material de construcción **no existen métodos de evaluación**, ensayos específicos, parámetros o criterios a evaluar, lo que por ende le otorga un carácter **restrictivo en su aplicación constructiva**. Esto repercute indirectamente en malas prácticas, y merma el interés en innovaciones tecnológicas con tierra. Al no haber oportunidad de adaptar o modificar las técnicas de construcción con tierra a las necesidades de hábitat en la actualidad, se refuerza la percepción anacrónica de esta arquitectura y la idea de un **material pobre** (constructivamente) y para pobres.

Preguntas de Investigación

Para dar respuesta a lo expuesto, se plantean las siguientes preguntas, las cuales guían la investigación:

- ¿Un entrepiso de pajarcilla puede **cumplir con los requerimientos estructurales** de la normativa vigente?
- ¿De qué manera se puede **evaluar el sistema de entrepiso** de pajarcilla ante la ausencia de normativa?
- ¿Cuál es la **influencia** de las propiedades y proporciones de los agregados en las **características mecánicas** de la pajarcilla?

34 Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda y Secretaría de Obras y Servicios, "Normas Técnicas Complementarias", Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal § (2017).

35 Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., "Catálogo de normas ONNCCE" (Ciudad de México: ONNCCE, 2023).

1.5 JUSTIFICACIÓN

1.5.1 Prefabricación para agilizar procesos

La prefabricación en la construcción con tierra **no es un tema nuevo**. Tomando en cuenta que los **primeros adobes** se fabricaban a mano, al ser piezas que se ejecutan previo a su colocación final se puede tomar como un prefabricado. Hasta el año 700 a.e.c. aparece el adobe rectangular, una invención olmeca que **tendía a la estandarización** en la construcción. Esto propició avances más rápidos en las obras monumentales y la posibilidad de su producción en masa facilitó programas de construcción mayores³⁶.

La prefabricación en arquitectura se había vinculado únicamente a materiales como el concreto, el acero, el aluminio o el plástico, en tiempos más recientes la construcción con tierra se ha **tornado hacia el desarrollo de componentes prefabricados**, ya que se postula que con esto se pueden mejorar las características naturales del material, así como **garantizar las cualidades** óptimas para su empleo y puesta en obra³⁷. Lo anterior está ligado a un **aspecto económico**, ya que muchas veces, los materiales más conocidos (como el tabique, concreto o acero) se encarecen por los traslados que requieren para llegar a la mayoría de las regiones, por lo que la respuesta puede estar en los materiales que se tienen al alcance³⁸.

Entre las ventajas que se mencionan de la prefabricación con tierra están: la **reducción de humedad en la obra** y por tanto un proceso más limpio y simple, así mismo se optimizan las condiciones de manufactura controlando la **calidad del producto**, así como la **reducción de los costes** en mano de obra y tiempos de ejecución³⁹. Por otra parte, esto representa una **planificación** más rigurosa y, a pesar de que se reducen costos en manufactura, se ha visto que edificios construidos con elementos prefabricados de tierra resultan ser más caros debido al **sobrecosto que representa el transporte** de las piezas a grandes distancias⁴⁰.

1.5.2 Datos sobre desempeño mecánico

Para lograr las cualidades óptimas para su colocación final es necesario **conocer las propiedades mecánicas** del material⁴¹. Aunque las mezclas de tierra y paja han sido estudiadas en diversas ocasiones, siempre se tienen variables que impactan en los resultados presentados, desde la técnica constructiva, el tipo de tierra y la fibra utilizada, así como las cantidades y los métodos de prueba realizados. Por estas razones es que se propone la ejecución de **pruebas mecánicas a la pajarcilla** a utilizar en el entrepiso semi-prefabricado.

36 Daneels Annick, "Introducción".

37 Guillermo Casares Ruiz y Rosa Gustamante Montoro, "Arquitectura de tierra en el S.XXI", s/f.

38 Secretaría de asentamientos humanos y obras públicas, "Los que saben son los que la viven".

39 Franz Volhard, "Light earth brick and blocks", en *Light Earth Building*, English (Basel: Birkhäuser, 2016), 130–34.

40 Casares Ruiz y Gustamante Montoro, "Arquitectura de tierra en el S.XXI".

41 Casares Ruiz y Gustamante Montoro.

1.5.3 Aplicación ante omisión de normativa

Aunque se menciona que, en un futuro cercano la construcción con tierra deberá contar con normativas o controles de calidad⁴², este trabajo no busca proponer una normativa ni estándares mínimos, sino comenzar por **evaluar la pajarcilla**, como cualquier otro material constructivo y **determinar si cumple con lo establecido en la normativa mexicana** al ser implementado en un entrepiso.

1.6 HIPÓTESIS

Si tras la **evaluación de un entrepiso semi-prefabricado** de pajarcilla, se **cumple con las solicitudes estructurales** establecidas en la normativa mexicana, este podrá ser **implementado en la construcción contemporánea**, a pesar de no estar contemplado en los reglamentos de construcción.

1.7 OBJETIVOS

1.7.1 Objetivo general

Determinar si un entrepiso semi-prefabricado de pajarcilla, **cumple con las demandas estructurales** establecidas en la normativa mexicana.

1.7.2 Objetivos Particulares

1. **Diseñar el prototipo del entrepiso** semi-prefabricado de pajarcilla con base en el sistema tradicional y el análisis histórico sobre el uso de tierra en elementos horizontales.
2. **Identificar las características de la tierra** a partir de pruebas de laboratorio y campo, para determinar su tipo y propiedades.
3. **Seleccionar y analizar los componentes y variaciones** de la pajarcilla tomando como referencia casos análogos e información bibliográfica para proponer un diseño de mezcla.
4. **Evaluar la resistencia a flexión y compresión** de las distintas mezclas de acuerdo con lo establecido en la NMX-C-303-ONNCCE y NMX-C-508-ONNCCE para elegir la mezcla de acuerdo con su desempeño mecánico.
5. **Identificar los requerimientos de carga** que deberá resistir el sistema y sus componentes de acuerdo con los reglamentos y criterios constructivos.
6. **Establecer las características de la pieza prefabricada** a partir del diseño del entrepiso y los casos análogos para su evaluación mecánica conforme a lo indicado en la NMX-C-405-ONNCCE.
7. **Realizar la evaluación de la propuesta** de acuerdo con las NTC sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones para determinar el cumplimiento del entrepiso.

42 J. Cid, F. R. Mazarrón, y I. Cañas, “Las normativas de construcción con tierra en el mundo”, *Informes de la Construcción* 63, núm. 523 (el 30 de septiembre de 2011): 159–69, <https://doi.org/10.3989/ic.10.011>.



2. MARCO REFERENCIAL CONCEPTUAL

2. MARCO REFERENCIAL-CONCEPTUAL

2.1 TÉCNICA CONSTRUCTIVA

2.1.1 Tierra Aligerada/Pajarcilla

La tierra aligerada, bajo una definición establecida en el Lehm bauordnung de 1944⁴³ es una masa de **tierra mezclada con algún agregado aligerante**, con lo que se obtiene **densidades menores a 1200kg/m³**. Como la técnica constructiva ha sido adaptada a los recursos de cada entorno, han aparecido variantes cuyo nombre responde al agregado aligerante de la mezcla, por lo que también se conoce como “fibra-arcilla” o “paja-arcilla”⁴⁴.



Fig 22 Leichtlehbau en Alemania. Volhard, 2016.



Fig 23 Terre Allégée en Francia. Fotografía del autor.



Fig 24 Adobillo en Chile. Adobe patrimonial, 2020.



Fig 25 Pajarcilla en México. Fotografía del autor

Como su nombre lo indica, su ligereza es su principal característica, por lo que se llega a subdividir de acuerdo con su densidad en: ligera, media y pesada. La más densa se encuentra entre los **800-1200kg/m³** (pesada), mientras que el grado medio va de los **600-800kg/m³** (media) hasta la más ligera, que ronda entre los **600-300kg/m³** (ligera)⁴⁵. Gernot Minke menciona que en densidades menores a 600kg/m³, la tierra no tiene la capacidad de proteger a la fibra de insectos, humedad o despedimiento⁴⁶ y tampoco se recomienda utilizar densidades de 600-800kg/m³ para entrepisos que estarán sometidos a esfuerzos o carga viva. Por su parte, se dice que las mezclas pesadas o densas, tienen buena estabilidad para usarse en **en-**

43 Franz Volhard, “Building with earth-a historical overview”, en Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth, English (Basel: Birkhäuser, 2016), 33–40.

44 Volhard.

45 Volhard.

46 Gernot Minke, “Earth as a building material: the essentials”, en Building with earth. Design and Technology of a Sustainable Architecture, English (Basel: Birkhäuser, 2006).

trepisos e incluso para hacer bloques o **elementos prefabricados**⁴⁷.

Por estar dentro de los **entramados**, la pajarcilla requiere una estructura principal de madera o algún otro material. Para el caso del entrepiso, se usan **viguetas de madera**, que deberán cumplir con los requerimientos tanto estructurales como de seguridad contra el fuego. Sobre ellas se colocan los **refuerzos transversales** simplemente apoyados en la parte superior de las viguetas o bien, sobre rieles clavados a los costados. Una tercera opción, que mezcla las ventajas del apoyo simple sin aumentar el peralte del entrepiso, se logra insertando los refuerzos en pequeñas ranuras a lo largo de las viguetas⁴⁸.

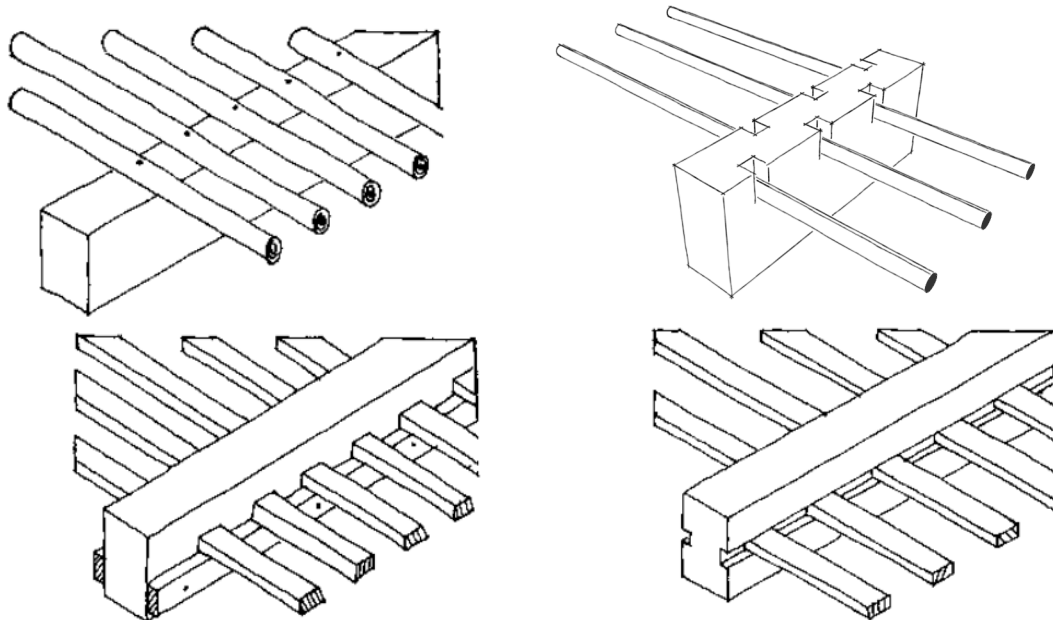


Fig 26 Soluciones de apoyos entre refuerzos y viguetas de madera para entrepisos o cubiertas de tierra aligerada. a), c), d) tomado de Volhard, 2016. b) autoría propia.

2.1.2 Aplicación en húmedo

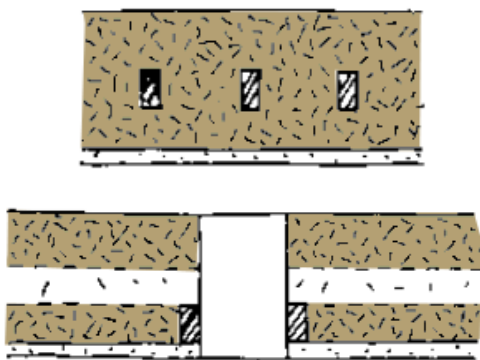


Fig 27 Cortes constructivos de la técnica original. Tomado de Volhard, 2016. Edición propia.

La técnica original consiste en **rellenar paneles de 8 a 15 cm** de grosor, entre viguetas de madera. La cimbra utilizada para esto se retira en cuanto se termina de rellenar. La parte inferior del entrepiso se puede aplanar con la misma mezcla de tierra y paja o colocar algún acabado con cal o yeso. En el caso de utilizar una mezcla más suelta o pesada, se recomienda dejar la **cimbra permanente**. A mayor densidad mayor es la aislación⁴⁹.

47 Franz Volhard, "Preparation of the light earth mix", en *Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth*, English (Basel: Birkhäuser, 2016), 69–78.

48 Franz Volhard, "Floors and ceilings", en *Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth*, English (Basel: Birkhäuser, 2016), 107–18.

49 Volhard.

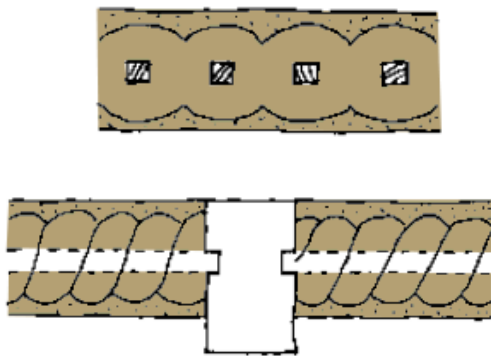


Fig 28 Cortes constructivos de la técnica de los rollos. Tomado de Volhard, 2016. Edición propia.

Los rollos son otra forma de aplicación en húmedo. Para fabricar estos elementos se toma un “racimo” de paja preferentemente larga y se inserta en la barbotina, procurando que toda la paja quede recubierta. Una vez “pintada” la paja con la tierra, se extiende la mezcla en una mesa, procurando obtener un cuadrado. Se toma el refuerzo de madera, y en diagonal, se **va enrollando la mezcla de esquina a esquina**. La mezcla del rollo debe cubrir toda la longitud del refuerzo. El diámetro de los rollos va de los 10 a los 15 centímetros y cualquier irregularidad puede repararse embarrando la misma mezcla⁵⁰.

Conforme se van realizando los rollos, están listos para ser insertados. Al colocarse deben irse **presionando uno contra otro** para propiciar su adherencia. Posteriormente, se rellenan las cavidades o huecos que existan entre las uniones de los rollos, para esto existen dos técnicas denominadas: **piso completo o medio piso**, la diferencia está que en el primero se le coloca una capa extra de mezcla en la parte superior, lo que la hace más pesada, pero con mayor aislación acústica térmica e ignífuga, mientras que la segunda solo se nivela el entrepiso con una capa delgada, obteniendo un sistema más ligero⁵¹.

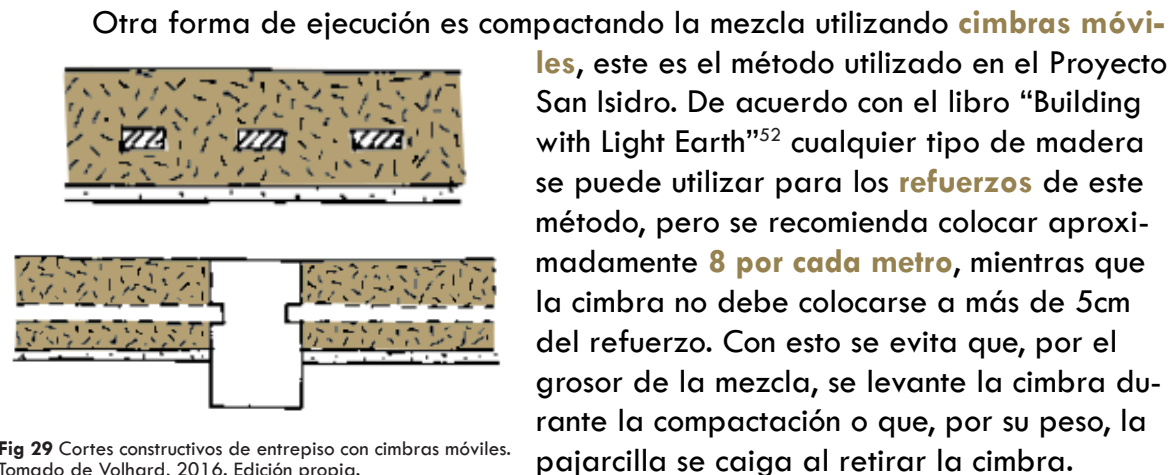


Fig 29 Cortes constructivos de entrepiso con cimbras móviles. Tomado de Volhard, 2016. Edición propia.

Otra forma de ejecución es compactando la mezcla utilizando **cimbras móviles**, este es el método utilizado en el Proyecto San Isidro. De acuerdo con el libro “Building with Light Earth”⁵² cualquier tipo de madera se puede utilizar para los **refuerzos** de este método, pero se recomienda colocar aproximadamente **8 por cada metro**, mientras que la cimbra no debe colocarse a más de 5cm del refuerzo. Con esto se evita que, por el grosor de la mezcla, se levante la cimbra durante la compactación o que, por su peso, la pajarcilla se caiga al retirar la cimbra.

Durante la compactación de estos métodos, el trabajador debe estar **arrodillado e inclinado** para insertar la pajarcilla, desde la parte superior o frontal (dependiendo la fuente) y se comenzará a compactar por las equinas y alrededor de los refuerzos, que se van colocando conforme se va compactado. No se debe pisar directamente sobre la pajarcilla mientras no esté seca.

50 Volhard.
51 Volhard.
52 Volhard.



Fig 30 Posición del trabajador durante la construcción del entrepiso o cubierta de pajarcilla. Izquierda: postura durante el compactado desde la parte superior. Derecha: aplicación de acabados o presión de la mezcla en el piso de listones.

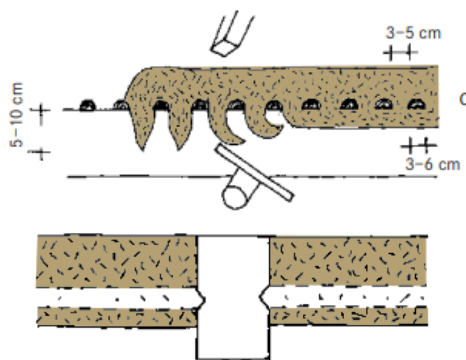


Fig 31 Cortes constructivos de piso de listones. Tomado de Volhard, 2016. Edición propia.

Existe también el **piso de listones**, donde la tierra aligerada, más parecida al bajareque, **se embarra desde arriba**, ejerciendo presión contra los listones. El espacio entre listones es de 3-5cm y por la presión que se ejerce, la mezcla comienza a colgarse en la parte inferior en forma de “lenguas” las cuales **se vuelven a presionar desde abajo** para generar un cielo raso con el mismo material de relleno. Se puede aplicar otra capa más fina del mismo material o en su defecto mezclada con cal⁵³.

2.1.3 Aplicación en seco

En el mercado actual se encuentra un **amplio rango de piezas o bloques** de tierra aligerada hechos con distintos agregados, con densidades que van desde los 400-1200kg/m³, esto en búsqueda de facilitar su manejo y colocación. Por esta misma razón, los bloques no suelen ser mayores a **80cm**, mientras que los paneles si llegan hasta los **120cm** de longitud⁵⁴.

La manufactura de estos elementos modulares o prefabricados puede darse por **compactación manual** o utilizando una **prensa**. Para el primer caso se debe introducir la mezcla en forma de rollos y distribuirla en el interior del molde, con ayuda de un elemento puntiagudo se comienza a compactar en las esquinas y rincones y posteriormente se compacta toda la capa con ayuda de un pisón de mano. En cuanto a la fabricación con prensa, la fuerza aplicada debe ser entre **0.2-0.4 kg/cm²**, lo cual es mucho menor a la necesaria para los bloques de tierra comprimida (7-10 kg/cm²)⁵⁵. Ambos procesos se deben realizar por capas (de 10cm aprox.) y en caso de necesitar un **refuerzo interior**, este se coloca conforme se elabora el bloque.

53 Volhard.

54 Franz Volhard, “Self-produced bricks and panels”, en Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth, English (Basel: Birkhäuser, 2016), 136–41.

55 Volhard.

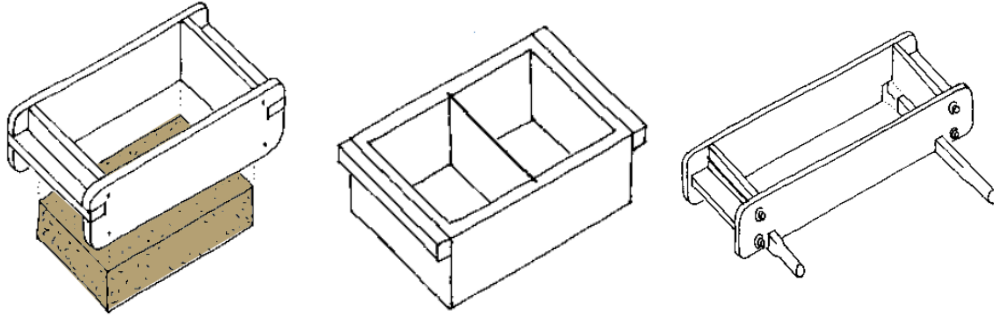


Fig 32 Distintos moldes de acuerdo al material y especificaciones de la pieza. Tomado de Volhard, 2016, edición propia.



Fig 33 Molde de madera para piezas curvas. Tomado de Volhard, 2016.



Fig 34 Prensa desmontable de madera para piezas de pajarcilla. Tomado de Pereyra Gigogne 2003.

Cualquiera de los procesos de manufactura **requiere un molde** donde introducir la mezcla y una tapa o placa para compactarla, los cuales pueden fabricarse con madera, metal o algún otro material rígido. El molde deberá tener **1.5 veces la altura** que se busca en el bloque, lo que permite colocar la mezcla suelta para ser compactada. En cuanto a las otras dimensiones, no se requiere considerar holgura alguna, ya que la **fibra evita la contracción de la tierra**. Importante colocar un tope al interior del molde para asegurar que la pajarcilla se compacte a la altura definida. Una vez completado el relleno, se debe **desmoldar el bloque para su secado**. Cuando estén completamente secos, se pueden apilar para optimizar espacio, procurando el paso de aire entre ellos⁵⁶.

Los bloques o piezas prefabricadas de tierra aligerada o pajarcilla se han utilizado en **losas de entrepisos o cubiertas**, pero siempre con refuerzos y sobre una estructura de madera. Se aconseja que los refuerzos sean de madera y que se coloquen en función de 6/por metro o bien a cada 16.667cm como máximo. Otro aspecto para considerar es el apoyo de las piezas en las viguetas, donde se debe garantizar que el **refuerzo interior** recaiga directamente sobre la estructura de madera. Las recomendaciones de Pollack/Richter citadas por Volhard⁵⁷ incluyen dimensiones recomendadas para bloques de entre 50-80cm de largo, cuyo **ancho irá en función del espesor**. Para piezas con peralte de 14-18cm se buscarán anchos aproximados de 24cm, mientras que, para peraltes de 8-14cm el ancho aumenta a 32cm.

⁵⁶ Volhard.

⁵⁷ Franz Volhard, "Protection of the construction", en Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth, English (Basel: Birkhäuser, 2016), 159–62.

2.2 TIERRA EN SISTEMAS HORIZONTALES

El uso de **tierra en losas, pisos o entrepisos** está menos registrado en comparación a su aplicación en muros. Sin embargo, en el libro “Floors above ground level” de ONU Hábitat⁵⁸ se aborda el uso de tierra en la construcción de elementos horizontales, separados en: pisos y techos. Por el tema de esta investigación, únicamente se tomarán de referencia aquellos pisos que **no se desplanten directamente sobre el suelo** y para las cubiertas, solo las que sean **planas en su superficie**. Dichos sistemas se clasifican de acuerdo con el modo o función que cumple la tierra dentro del sistema.

2.2.1 Tierra como estructura

Cuando la tierra es usada como estructura esta es, tradicionalmente, **reforzada en su interior** con madera, bambú y en algunas ocasiones con acero. Tienden a ser losas demasiado **pesadas**, registrando en promedio $500\text{kg}/\text{m}^3$ ⁵⁹.

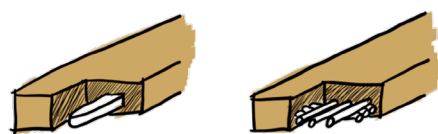


Fig 35 Diagrama de tierra como estructura.
Autoría propia a partir de ONU Hábitat 1992.

2.2.2 Tierra en superficie

En otros casos, la tierra se usa como superficie, donde es colocada **sobre una capa de tablillas** de bambú, tablas, ramas u hojas secas, mismas que están soportadas por una **estructura de madera**, bambú o algún otro material. Por lo general la **tierra es compactada** llegando a tener un peso de $250\text{kg}/\text{cm}^2$. En otras ocasiones se utiliza fibra-arcilla, lo cual reduce su peso hasta $150\text{kg}/\text{cm}^2$. El grosor en ambos casos oscila entre los **10 y 15 cm** y se le suele colocar una capa estabilizada de tierra con paja o algún revestimiento para protegerla⁶⁰.

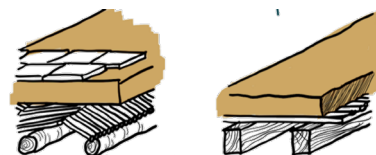


Fig 36 Diagrama de tierra como superficie
Autoría propia a partir de ONU Hábitat 1992.

2.2.3 Tierra en relleno

También se suele utilizar la tierra **únicamente como relleno**, debido a sus características térmicas y acústicas. De esta técnica derivan muchos métodos.



Fig 37 Diagrama de tierra como relleno en seco.
Autoría propia a partir de ONU Hábitat 1992.

- i. Se puede utilizar **tierra seca**, la cual va compactada entre dos **cimbras de madera** o algún otro material. En algunos casos se realiza una bóveda de cañón corrido que funciona como cimbra inferior. La **forma curva permite una mayor distancia entre apoyos**, llegando hasta los

58 United Nations Centre for Human Settlements (Habitat), “Floors above ground level”, en *Earth Construction Technology* (Nairobi: United Nations, 1992), 74–81.

59 United Nations Centre for Human Settlements (Habitat), “Floors above ground level”.

60 United Nations Centre for Human Settlements (Habitat).

- 2 metros. Sin embargo, por el esfuerzo que se da conforme se distancian los apoyos, estos se han tenido que realizar de acero o concreto⁶¹.
- ii. Otro caso donde se utiliza una **cimbra perdida** la cual se realiza con bambú o madera, dependiendo si se buscan cubiertas curvas o planas. En esta variante se coloca **fibra-arcilla** lo que ocasiona que, al secado, la cubierta sea más liviana. Para las **planas**, se colocan **refuerzos al interior** de la mezcla, que no son más que redondos de madera de 2" aproximadamente⁶².
- iii. La **prefabricación** se puede realizar en paneles los cuales se realizan de manera similar a los adobes. Este método permite una separación mayor entre los apoyos de la estructura, hasta 90cm, mientras los elementos se han realizado desde **0.40-1.20m** de largo con **15 cm de espesor**. Los pesos por cada pieza dependerán de la mezcla y las dimensiones, los cuales están entre los **35-120kg**. En algunas ocasiones se les coloca una **capa de compresión** de concreto para asegurar la distribución de cargas que recibirá la losa⁶³.
- iv. El sistema más conocido y difundido en nuestro país son los **terrados**, los cuales constan de una **estructura de morillos o troncos** de madera y en algunas ocasiones vigas cuadradas las cuales se colocan directamente sobre los muros, con **separación de 50cm** entre ellas. Sobre estas se hace un **techo de varas de otate** atadas a las vigas para recibir la tierra que muchas veces se mezclaba con cal en estado seco y se compactaba con ayuda de un mazo o tabla. Por último, se hace un **entortado de cemento-arena-grava** que hace las veces de capa de compresión⁶⁴.
- v. Se contemplan elementos o sistemas que constan de estructuras de concreto o acero y elementos de tierra mezclada con cemento. Donde se desprecian las capacidades de la tierra como material constructivo, por lo que no se describirán de forma detallada.



Fig 38 Diagrama de tierra como relleno con fibras. Autoría propia a partir de ONU Hábitat 1992.

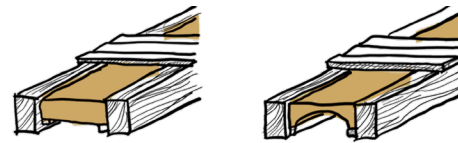


Fig 39 Diagrama de tierra en prefabricados. Autoría propia a partir de ONU Hábitat 1992.

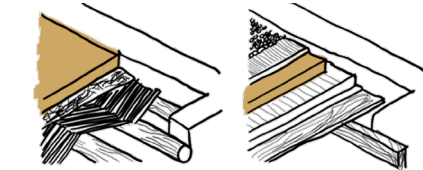


Fig 40 Diagrama de terrados. Autoría propia.

61 United Nations Centre for Human Settlements (Habitat).

62 United Nations Centre for Human Settlements (Habitat).

63 United Nations Centre for Human Settlements (Habitat).

64 Secretaría de asentamientos humanos y obras públicas, "Los que saben son los que la viven".

2.3 PREFABRICACIÓN EN ARQUITECTURA DE TIERRA

2.3.1 Adobillo

El adobillo es un bloque tradicionalmente utilizado en **Valparaíso, Chile**. Sus dimensiones son 45x10x10cm o 45x15x10cm, siendo así de menores dimensiones que el adobe de dicha región, razón por la cual se le conoce como “adobillo”. Se fabrica con una **mezcla de tierra y paja compactada** dentro de un molde. Posteriormente, los bloques se “ensamblan” en la estructura de madera, dando como resultado un **sistema mixto de madera y tierra**⁶⁵.

Al muro fabricado con esta técnica se le conoce como tabique-adobillo y el ensamble del bloque con la estructura de madera se da gracias a las **muescas del adobillo en sus extremos**. Esta característica única, dota al sistema de una capacidad sismo resistente, ya que a diferencia de otras técnicas donde la madera es la estructura y la tierra solo es relleno, se puede decir que el adobillo también actúa como **arriostramiento de la madera** debido a sus dimensiones y sujeción. Por esta razón algunos autores han definido al adobillo como “**carpintería de tierra**”⁶⁶.



Fig 41 Piezas de adobillo. Fotografías de Adobe patrimonial, 2020. Edición propia.

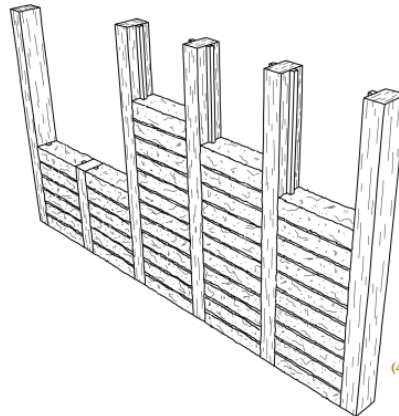


Fig 42 Diagrama constructivo de tabique-adobillo. Tomado de Dávila y Contreras, 2022.

2.3.2 Machimbloque

El Machimbloque es una propuesta de **bloque ensamblable** que busca aprovechar los recursos disponibles en el entorno, (tierra y mano de obra no especializada) y de esta forma abatir los costos de construcción en las zonas rurales y semiurbanas de México. La idea principal de este sistema era que cualquier persona pudiera fabricar los bloques a partir de un “**fácil tratamiento de la tierra**”⁶⁷.

65 Valentina Dávila Urrejola y Javiera Contreras Silva, “¿Qué es el adobillo?”, en *El adobillo. Cultura constructiva de Valparaíso*, ed. Álvaro Riquelme Bravo, 2da edición, 2022, 11–19.

66 Valentina Dávila Urrejola, “El tabique-adobillo como sistema constructivo”, en *El adobillo. Cultura constructiva de Valparaíso*, ed. Álvaro Riquelme Bravo, 2da edición, 2022, 20–40.

67 Raúl Sánchez Mora, “Machimbloque de tierra comprimida estabilizada”, en *Tercer Simposio CIB/RI-LEM* (México D.F.: SECOFI, 1983).

El creador del machimbloque establece que cualquier material apto para fabricar adobes, puede ser utilizado para esta técnica, haciendo la aclaración de buscar una **tierra limosa-arcillosa** con plasticidad media y un contenido de arena entre el 10 y el 20%. También propone la estabilización de la tierra con **cal o cemento**, cuya concentración no supere el 10% en peso seco. Para la fabricación de los bloques se utiliza una **maquina compresora de operación manual**, la cual está diseñada con mecanismos simples y puede ser transportada a pesar de su peso de 350kg⁶⁸. La **presión** que se ejerce a la tierra para la fabricación del machimbloque es de **30kg/cm²**.



Fig 43 Piezas de machimbloque y colocación en obra. Fotografías de Comunal Taller, 2020. Edición propia.

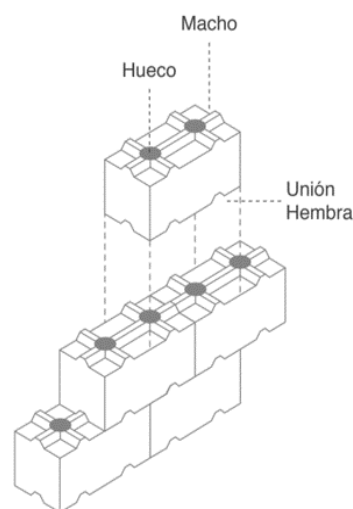


Fig 44 Diagrama de ensamble de machimbloque. Tomado de Comunal Taller, 2020.

Las piezas que se obtienen son de **35x17.5x11cm**, con un peso de entre **9-10.5kg** y registran una resistencia a compresión de **35-80kg/cm²**. Debido a su geometría, su rugosidad y las costillas que tiene el machimbloque, este puede tener **ligadura con otras piezas en los 3 sentidos**, evitando así el uso de mortero entre las piezas, además de no ser necesaria la colocación de castillos en las esquinas y cruces de muros. Donde sí se coloca un elemento de concreto armado es en la parte superior, como cadena de cerramiento⁶⁹.

2.3.3 Hourdi Blocks

En Auroville India, trabajan con bloques de tierra estabilizada comprimidos usando una prensa manual, la **“Auram Press”**, desarrollada por ellos mismos y basada en el funcionamiento de la Cinvaram desarrollada en los años 50's. Los bloques que obtienen los nombran **“bloques de arcilla estabilizada”** CEB por sus siglas en inglés. La estabilización de la tierra se hace con cal o cemento y los CEB pueden ser comprimidos de diversas formas para obtener alrededor de **70 bloques diferentes**⁷⁰.

68 Sánchez Mora.

69 Sánchez Mora.

70 Auroville Earth Institute, “Compressed stabilized earth block”, Building with earth, consultado el 12 de noviembre de 2022, https://www.earth-auroville.com/compressed_stabilised_earth_block_en.php.

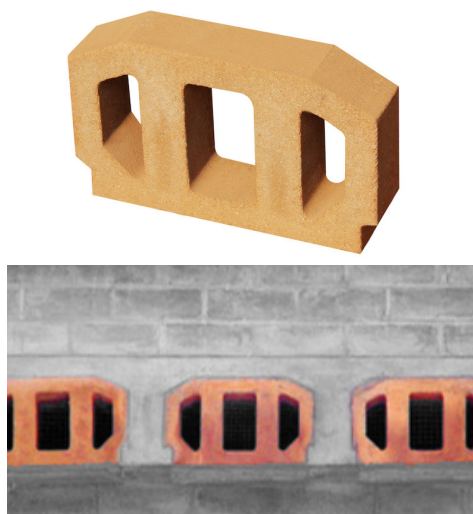


Fig 45 Pieza bloque 400 y aplicación en cubierta.
Fotografías de Auroville Earth Institute, 2022. Edición propia.



Fig 46 Prensa utilizada en Auroville Earth Institute para fabricar distintas piezas. Tomado de Comunal Taller, 2022.

Entre las diversas opciones se encuentran los **Hourdi blocks 400**, utilizados para las cubiertas junto con perfiles T o viguetas de concreto. Las dimensiones del bloque 400 son **40x24x8.5cm**⁷¹. La aplicación en **cubiertas o entresijos** se entiende como una técnica compuesta, donde las viguetas o perfiles trabajan a flexión y los bloques lo hacen a compresión⁷². A partir de pruebas empíricas se ha establecido su **resistencia en 3125kg/m²**, además de tener hasta 4 veces menos energía embebida por ser comprimidos en vez de ser cocidos al fuego⁷³.

2.3.4 Tapial prefabricado

Los **paneles de tapial o tierra apisonada** se presentan como una alternativa a los muros masivos de la forma tradicional. Son una solución cuando se tiene interés en esta técnica, pero no se cuenta con el espacio suficiente o se busca mantener bajo el peso del edificio. Estas piezas son **prefabricadas en taller** y para su colocación se adosan a la estructura del edificio o sobre el propio muro como recubrimiento. Se debe tomar en cuenta que al tener **grosos menores (de 6cm)** también disminuye la inercia térmica del elemento, pero se logra aligerar la técnica hasta 130kg/m² ⁷⁴.

Si no se quiere sacrificar la capacidad térmica del tapial, existen opciones como las de la constructora LehmTonErde, donde se prefabrican tapias de mayores grosos, con ciertos cambios con respecto al tradicional. Iniciando por la **unificación de la mezcla**, con una granulometría específica que, en este caso, ocupa mucha más grava y es más seca. Otro aspecto es el **control de compactación**, el cual se realiza con el vertido, con aire comprimido y rodillos vibradores⁷⁵.

71 Auroville Earth Institute, "Auram blocks data", Building with earth, consultado el 12 de noviembre de 2022, https://www.earth-auroville.com/auram_blocks_data_en.php.

72 Auroville Earth Institute, "Hourdi roofing", Architecture, consultado el 12 de noviembre de 2022, <https://dev.earth-auroville.com/hourdi-roofing/>.

73 Auroville Earth Institute, "Compressed stabilized earth block".

74 Casares Ruiz y Gustamante Montoro, "Arquitectura de tierra en el S.XXI".

75 Casares Ruiz y Gustamante Montoro.

Los elementos prefabricados tienen **grosos desde los 20cm hasta los 60cm**, con alturas máximas de **2.80m** y longitudes de hasta **20 metros**. Por las medidas y la técnica constructiva, un problema que se presenta es el transporte, pero en la práctica se han transportado piezas de hasta 7 toneladas a distancias superiores a los 800km⁷⁶.

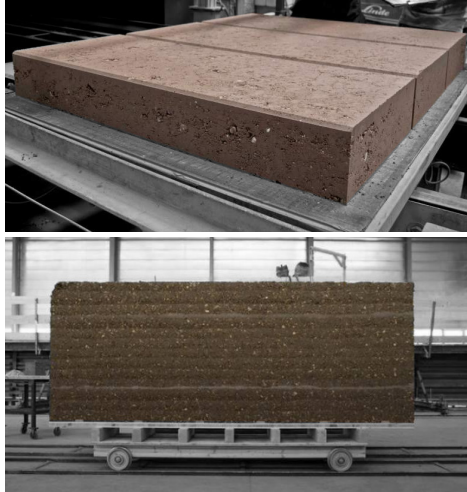


Fig 47 Elementos prefabricados de tapial. Fotografías de Tectonica, s/f y Cázares y Gustamante, s/f. Edición propia.



Fig 48 Almacenaje de tapiales prefabricados. Tomado de Cázares y Gustamante, s/f.

2.3.5 Swallow brick

Una propuesta que aprovecha la **aislación e inercia térmica** de la pajarcilla es la presentada por Construcciones Maroba, que consta de **bloques de relleno** en cualquier estructura de cerramiento exterior o interior. La presentación del bloque es de **48x30x24cm** con un peso aproximado de **26 kg**⁷⁷. La tierra de la mezcla ayuda a la parte térmica, además de hacerlo **ignífugo**, mientras que la paja aporta la **aislación acústica** y reduce a la mitad la conductividad térmica⁷⁸.



Fig 49 Swallow brick y su colocación en obra. Fotografías de Swallow brick, 2022. Edición propia.



Fig 50 Almacenaje y acomodo para venta del Swallow brick. Tomado de Swallow brick, 2022.

76 Casares Ruiz y Gustamante Montoro.

77 “Swallow brick: bloque para bioconstrucción”, Bloque aligerado de tierra y paja, consultado el 17 de noviembre de 2022, <https://www.swallowbrick.com/bloque/>.

78 “Swallow brick: bloque para bioconstrucción”.

2.4 OTROS DESARROLLOS EN CUBIERTAS

2.4.1 Domotej

Bajo la lógica de la **autoconstrucción**, se buscó brindar una solución factible para personas de bajos recursos al utilizar materiales artesanales de la localidad como: **petatillo, alambre recocido, cemento, arena y agua**. El sistema Domotej se basa en una **cúpula** de base cuadrada de **98x98cm**, espesor de **3.5cm** y una altura en el centro de la cúpula de **6cm**. Para fabricar dicha cúpula se requiere un molde compuesto de 2 partes, una base cuadrada de madera o metal y una cimbra, la cual se propone con arena húmeda vertida en una película de plástico o lona dispuesta en el suelo, para dar la forma de casquete⁷⁹.

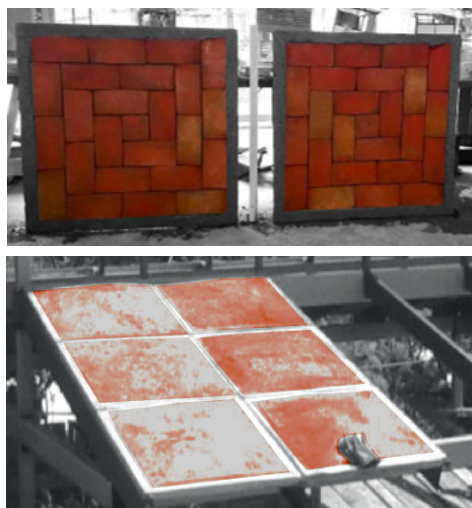


Fig 51 Fabricación del Domotej en obra. Tomado de Castañeda Nolasco, 2022.

Fig 52 Presentación de Domotej y colocación sobre vigas metálicas. Fotografías de Castañeda Nolasco, 2022. Edición propia.

Las piezas domotej pesan entre **70-74kg**, por lo que se cumple con lo establecido en América Latina con respecto a que los componentes de autoconstrucción no deben pesar más de 90kg, aunque **para su colocación se requieran 2 personas**. Las piezas se colocan sobre una estructura metálica o de concreto armado con una separación de 1m a ejes. Sobre el domotej se instala una malla electrosoldada para recibir la capa de compresión de concreto de 3cm aproximadamente. Como acabado y para mejorar la resistencia a la humedad, se coloca un impermeabilizante⁸⁰.

2.4.2 Sugarcrete

En búsqueda de un **uso eficiente de los desechos de la agricultura**, la Universidad del Este de Londres (UEL por sus siglas en inglés), en conjunto con Grimshaw Architects y Tate&Lyle Sugar, desarrollaron el “sugarcrete” o concreto de azúcar. La innovación principal de este desarrollo es desafiar la concepción de que los biomate-

79 Gabriel Castañeda Nolasco, “Antecedentes motivadores para la búsqueda de tecnologías apropiadas y apropiables para la vivienda de producción social”, en *Domotej. Tecnología para techos de vivienda de producción asistida*, 2da edición (Tuxtla Gutiérrez: Universidad Autónoma de Chiapas, 2022), 19–110.

80 Gabriel Castañeda Nolasco, “Evaluación de la tecnología para techos Domotej”, en *Domotej. Tecnología para techos de vivienda de producción asistida*, 2da edición (Tuxtla Gutiérrez: Universidad Autónoma de Chiapas, 2022), 141–226.

riales tiene un bajo desempeño estructural y por tanto para auto portarse. El bloque de sugarcrete se fabrica con **bagazo y un aglutinante mineral**, dando como resultado un bloque **más ligero** que los tradicionales con 15% menos de huella de carbono. El sugarcrete resistió hasta **4.905 Mpa a compresión**⁸¹.



Fig 53 Preparación del sugarcrete para evaluación por peso. Tomado de Gutiérrez et al, 2022.

Fig 54 Piezas de sugarcrete y su ensamble visto en planta. Fotografías de Gutiérrez, et al 2022. Edición propia.

Los patrones geométricos de las piezas están inspirados en el método de entrelazado inventado y patentado en 1699 por el ingeniero Joseph Abeille. El entrelace de las piezas genera una **estructura autoportante** que resiste cargas externas **sin necesidad de agregar tensores o refuerzos**, aunque en la propuesta final si se utilizaron tensores de acero. Para probar la propuesta se subieron personas gradualmente a la losa llegando a soportar, sin fallar, 8 personas equivalente a **600kg**⁸².

81 Eduardo Souza, "From Agro-Waste to Sustainable Structures: Concrete Alternatives Made from Sugarcane", Archdaily, mayo de 2023, https://www.archdaily.com/1001501/from-agro-waste-to-sustainable-structures-concrete-made-from-sugarcane?fbclid=PAAaZRgUIQPc-hizA1b76w8W3h-b7LsbW3YbgqpE5enpnTEZK5ZWEr3KxsSQdg_aem_ASQa54QvSMdWSmq_VoD-fhv20ZHntpGO-12VURG0-VbGnHLk1bzq1vaYIJNQSet_z8_A.

82 Armor Gutierrez et al., "Sugarcrete. Slab report" (London, el 7 de noviembre de 2022), <https://uel.ac.uk/sites/default/files/uel-sugarcrete-slab-report---7-nov-2022.pdf>.



3. MARCO TEÓRICO

3. MARCO TEORICO

3.1 PAJARCILLA

3.1.1 La barbotina

Para la construcción con tierra aligerada, dentro de la que se encuentra la pajarcilla, se requiere mezclar la **tierra con agua** para formar una lechada de lodo, conocida como barbotina. También puede entenderse como **tierra en estado semilíquido**, con cierto espesor y viscosidad. Entre más arcillosa es la tierra, se puede trabajar con una barbotina menos espesa.

Para hacer la mezcla se recomienda **romper los grumos** de la tierra y posteriormente cribarla con una malla de 1-2cm de abertura, lo anterior para facilitar el mezclado con el agua. Aunque algunas tierras no requieren el cribado, por ser tierras cuyos tamaños de partícula son mayormente finos, con el **cribado** se separa la arcilla, junto con limos y algunas arenas, de la parte gruesa como lo son arenas y gravas. Una vez hecho lo anterior, se vierte en un recipiente con agua, hasta esperar a que la **tierra esté completamente húmeda**, lo que se comprueba una vez que dejan de aparecer burbujas de aire⁸³.



Fig 55 Vaciado de los componentes en un recipiente. Fotografía del autor.



Fig 56 Prueba de viscosidad de la barbotina. Fotografía del autor.



Fig 57 Consistencia adecuada para su uso en pajarcilla. Fotografía del autor.

El proceso de mezclado se puede hacer de forma **manual**, ya sea con ayuda de alguna pala, madera o con las manos. Aunque este proceso permite ir corroborando que los grumos de la tierra se vayan disolviendo y a su vez, irlos disgregando ya sea presionándolos con la mano o contra las paredes del recipiente, se recomienda dejar **reposar la barbotina al menos 24 horas** para activar la arcilla con el agua. Otra forma que se utiliza cuando no se tiene el tiempo suficiente es **con un**

83 Franz Volhard, "Preparation of clay slip", en *Light Earth Building*, English (Berlin: Birkhäuser, 2016), 57–65.

mezclador, como el que se ocupa para la pintura. Dentro de las ventajas que tiene este método es la **practicidad y rapidez** para mezclar grandes cantidades de barbotina, lo que se facilita al utilizar un contenedor cilíndrico⁸⁴.

Fig 58 Revoltura de la barbotina con ayuda de un mezclador de pintura o de forma manual con un palo de madera. Fotografías del autor.



Debido a que la cantidad de agua requerida puede depender del tipo de tierra, resulta **complejo determinar una relación agua-tierra**⁸⁵. Una prueba sencilla para saber si la consistencia de la barbotina es la adecuada, consta de **introducir una fibra** en la barbotina y retirarla de inmediato. Si al hacer esto, la fibra está recubierta de barbotina es un indicio de que la **viscosidad** de la barbotina es la correcta⁸⁶.

3.1.2 Preparación de los componentes

Para preparar la tierra aligerada o pajarcilla se debe mezclar la cantidad necesaria de **barbotina para que apenas cubra el agregado**, hasta que se pierda el color de las fibras. Para esto existen diferentes métodos, que tienden a ser más aptos para ciertos agregados. Si bien en el capítulo 4 se habla de las características de la fibra a utilizar, por hablar de pajarcilla se deberá entender que la barbotina estará mezclada con **paja de trigo** proveniente de pacas utilizadas para forraje. La preparación que estas requieren previo a su mezclado es casi nula, con la condición de que se encuentren **completamente secas**. El cortado de la fibra, no se determinó en este apartado ya que resultó de interés evaluar la influencia mecánica de la longitud de fibra, producto del corte en la preparación de los componentes.

Para el mezclado, el método más utilizado comienza por **esparcir la paja en una lona**, después se va rociando la fibra con la barbotina y se continúa el proceso **intercalando ambos componentes**. Una vez vertidas las cantidades a utilizar, se mezclan con ayuda de un biello o en casos donde se requieren grandes cantidades, se han tenido buenos resultados utilizando mezcladores industriales⁸⁷. Los componentes se deben revolver hasta obtener una mezcla lo **suficientemente seca para ser compactada**, pero con la cantidad de barbotina necesaria para **aglutinar la paja**⁸⁸.



Fig 59 Componentes de la pajarcilla: paja de trigo previamente empacada y tierra arcillosa. Fotografías del autor.

84 Volhard.

85 Volhard.

86 Caballero Cervantes, "Notas sobre bioconstrucción".

87 Franz Volhard, "Preparation of the light earth mix", en Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth, English (Basel: Birkhäuser, 2016), 69–78.

88 Caballero Cervantes y Guerrero Baca, "Entramados".

3.1.3 Diseño de mezcla



Fig 60 Colocación por capas de paja y barbotina para hacer la pajarcilla y mezclado con biello. Fotografías del autor.



Cantidades para 1 m ³		
Densidad kg/m ³	Tierra	Paja
	kg	kg
800	720,00	80,00
900	820,00	
1000	920,00	

Tab 1 Cantidades de tierra y paja en seco por m³ de mezcla de pajarcilla. Elaboración propia a partir de Volhard, 2016.

Las **proporciones** de la mezcla dependerán de las características que se buscan con los elementos constructivos. A menor cantidad de tierra, se obtienen **mezclas más ligeras**, por tanto, con mejor desempeño térmico **aislante**. Por el contrario, con mayor cantidad de tierra, la mezcla se hace **más pesada** y su desempeño térmico tiende hacia la retención o **masa térmica**. Para esta investigación interesan las mezclas pesadas, que van de **800-1200kg/m³**, que aparte de la retención térmica y buena aislación acústica, su estabilidad resulta buena para **paredes internas, entrepisos, elementos externos** con recubrimiento y **piezas prefabricadas** como bloques o paneles ⁸⁹.

Para saber cuál es esa cantidad idónea de barbotina se puede **corroborar de forma empírica**, conforme se van colocando las capas de paja y barbotina y se compensa cualquiera de los dos componentes. Sin embargo, esto requiere cierta experiencia en la elaboración de la pajarcilla además de complicar el control de calidad y de densidades de las propias mezclas, lo cual se vuelve vital al querer fabricar piezas prefabricadas. En la literatura se encontró que, con la **misma cantidad de fibra**, se pueden realizar mezclas pesadas o ligeras, lo único que se debe variar, es la cantidad de tierra que se utiliza para hacer la barbotina. Conforme se busquen mezclas más pesadas, se debe **aumentar la cantidad de tierra** respecto a la densidad que se busca en seco (ver tabla 1).

Por otro lado, la densidad de los elementos **depende, tanto de la mezcla, como de la fuerza de compactación**, ya que esta influye en la cantidad de aire que pueda quedar entre la mezcla. Si bien, cada tierra puede necesitar distinta proporción de agua para llegar a la consistencia de la barbotina, la cantidad de agua no es un aspecto relevante en cuanto a la densidad final de la técnica, ya que **la mayoría del agua utilizada se evapora** y solo se utiliza para cambiar la tierra de estado seco a semilíquido⁹⁰.

89 Volhard, "Preparation of the light earth mix".

90 Volhard.

3.2 PIEZA PREFABRICADA

3.2.1 Limitantes del diseño

Cuando se utiliza la **tierra para cubiertas**, la literatura indica que suelen ser **muy pesadas** (aproximadamente 300-500kg/cm²) por lo cual no se recomienda usar en zonas sísmicas. Aunado a lo anterior, las cubiertas de tierra son **sensibles al agua**, por lo que hay que tener especial cuidado para asegurar su impermeabilidad, que puede darse a partir de seleccionar suelos especiales como la caolinita, o suelos salinos, la **estabilización o algunos acabados** que protejan la tierra⁹¹.

Y aunque en la actualidad se pueden encontrar **diferentes productos prefabricados** de tierra aligerada o pajarcilla, en la mayoría de los casos se ocupa de **relleno** y siempre se hace la recomendación de **no utilizar** estos elementos en espacios que **estén sometidos a cargas vivas**, aun cuando tengan algún refuerzo en su interior⁹².

3.2.2 Resistencia por forma

Como cada técnica 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 tierra⁹³. Por tanto, se retoman **conceptos de resistencia por forma** para resolver la prefabricación de la pajarcilla en entrepiso. Entre ellos se encuentra el uso de **formas curvas** para repartición de cargas y promover la respuesta a compresión, por ser el esfuerzo ante el que mejor desempeño presenta la tierra. También se **evitan ángulos agudos** en las esquinas a fin de evitar zonas frágiles en las piezas.



Fig 61 Inicialmente se proponen 3 diseños para las pieza prefabricada. Para esto se tomaron en consideración las limitantes por material, el análisis histórico, los criterios del entrepiso tradicional de pajarcilla y los casos análogos. Elaboración propia.

También se deben tomar en cuenta las **transiciones entre la pajarcilla y la estructura principal**. Para esto es importante entender que los sistemas constructivos de tierra se pueden dividir en 2 grupos, de acuerdo con la forma en que se ocupa

91 United Nations Centre for Human Settlements (Habitat), "Floors above ground level".

92 Volhard, "Light Earth Panels".

93 Casares Ruiz y Gustamante Montoro, "Arquitectura de tierra en el S.XXI".

o la función que cumple la tierra. En primera instancia se tiene las **técnicas masivas** como el adobe, cob y la tierra compactada. Con estas se hacen muros portantes, que por su grosor **no requieren de apoyos** puntuales de refuerzos. Por otro lado, están los **sistemas entramados**, donde se encuentra el bajareque, pajareque, fajina y la pajarcilla, entre muchos otros. En estos casos se **combina una estructura leñosa, y una cobertura** de tierra y fibras. Como generalmente estos sistemas son de relleno, requieren el **apoyo de refuerzos adicionales** en caso de usarse en entresijos y cubiertas⁹⁴.



Fig 62 Técnicas masivas: Detalle de muro de adobe, inicio de muro de tapial y construcción de tierra apisonada que carga una losa catalana. Obras en Proyecto San Isidro. Fotografías del autor.



Fig 63 Entramados: Maqueta de muro de bajareque, detalle de entresijo de pajarcilla con acabado de yeso y cubierta de madera. Estructura de madera con muros de relleno. Obras en Proyecto San Isidro. Fotografías del autor.

3.3 ENTRESIJOS

3.3.1 Criterios estructurales para entresijos

Cada una de las partes que conforman las edificaciones de tierra deben ser concebidas para **trabajar en conjunto ante los esfuerzos** a los que estarán sometidos. Si en algún punto, algún elemento llega a presentar alteraciones, el equilibrio de todo el sistema se ve afectado. Si determinada área de un entresijo comienza a sufrir una concentración puntual de cargas, es muy probable que se **rebase la capacidad o resistencia del material**. Esto comienza con la disgregación paulatina de la tierra, lo que desequilibra el sistema y termina por afectar el resto de la estructura. Aunque por lo general, **las construcciones de tierra van absorbiendo estas alteraciones** y deformaciones, llega un punto en que se sobrepasan los límites y termina por fallar la estructura⁹⁵.

En el tema de la **transmisión de carga a los soportes**, se manejan dos soluciones: donde el soporte se encuentra independiente al muro y otra donde el propio muro funciona como soporte. Para los primeros se **propone recargar la losa** sobre

94 A Caballero Cervantes y Luis Fernando Guerrero Baca, "Técnicas de bioconstrucción", en *Experiencias de bioconstrucción: conceptos generales y visiones desde México*, 1ra edición (Ciudad de México: Bonilla Artigas, 2021), 52–59.

95 Luis Fernando Guerrero Baca, "Arquitectura de tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva", *Apuntes* 20, núm. 2 (2007): 182–201.

los cimientos, para el caso de funcionar únicamente como losa de desplante o bien un **soporte a lado del muro**, como extensión del propio muro, contrafuerte, o una **estructura de madera adosada** al muro⁹⁶.

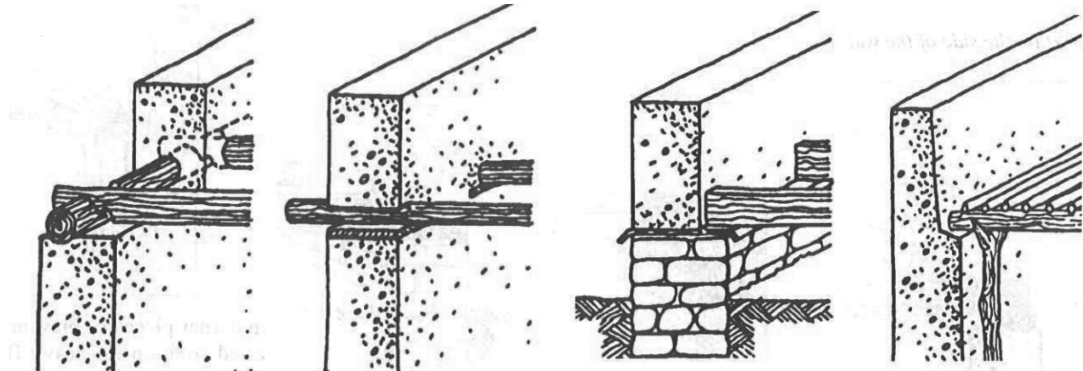


Fig 64 Soluciones para la transmisión de carga del entrepiso hacia los elementos verticales. Del lado izquierdo se apoya directamente al muro y del lado derecho los soportes a lado de muro o en estructuras adosadas. Tomado de ONU Hábitat, 1992.

En caso de que el **muro sea portante** se deben contemplar ciertos riesgos como la **concentración de carga**, así como las posibles rotaciones que podrían debilitar el muro debido al golpeteo. Por tal motivo se puede optar por **colocar una cadena perimetral** sobre el muro, donde recaerá la estructura de la losa. Esta cadena o viga collar puede ser de madera e incluso tierra amasada, con lo que las **cargas se distribuyen** de manera uniforme⁹⁷.

La colocación de una viga collar es considerada como una de las técnicas más eficaces para **estabilizar las estructuras de tierra**. Esta se coloca en la parte superior de los muros portantes, evitando con esto su volteo y aumentando la resistencia a cargas horizontales. Estas cadenas **proporcionan resistencia y rigidez** ante el movimiento fuera del plano. Para que funcionen correctamente es necesario que recorran toda la parte superior de los muros de carga, poniendo especial atención en las esquinas o encuentros de muros. Existen dos tipos de cadenas o vigas collares: **de madera y concreto**. Además de ser la más utilizada tradicionalmente, las cadenas de madera son flexibles y no afectan significativamente el comportamiento elástico de los muros de tierra ya sean de adobe, bajareque, COB o tapial, y es gracias a esta **compatibilidad entre materiales** que esta técnica de estabilización contribuye al comportamiento postelástico del edificio⁹⁸.



Fig 65 Armado de viga collar de madera previo a su colocación. Fotografías del autor.

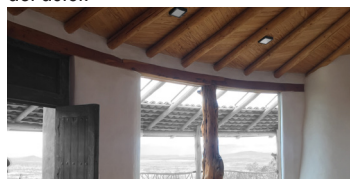


Fig 66 Viga curva sobre muro curvo. Fotografías del autor.



Fig 67 Ensamble en esquina de muros. Fotografías del autor.

96 United Nations Centre for Human Settlements (Habitat), "Floors above ground level".

97 United Nations Centre for Human Settlements (Habitat).

98 Michiels y Fonseca Ferreira, "Técnicas de estabilización sismorresistente para mejorar el comportamiento estructural de edificios históricos de tierra".

Ahora bien, los **elementos horizontales** como las cubiertas y los entrepisos pueden entenderse en términos estructurales como **diafragmas**. La función de estos es la transmisión de las cargas hacia los elementos verticales, de forma que ayude a la edificación a **trabajar en conjunto** al amarrar los muros ⁹⁹.

Sin embargo, en la construcción con tierra no es recomendable que los entrepisos o cubiertas trabajen como un diafragma rígido, más bien como un **diafragma flexible**, ya que al ser rígidos pueden provocar sobrecarga en los muros en plano, debido a las fuerzas transferidas por los muros fuera del plano, dañando gravemente los muros de carga. Una variante utilizada como diafragma flexible y parcial es el **entrepiso de madera contrachapada**. La ventaja que ofrecen este tipo de diafragmas recae en su limitada rigidez, lo que **evita la transferencia excesiva de carga a los muros**, reduciendo el riesgo de fallo por cortante en estos ¹⁰⁰.

Fig 68
Estructura
recíproca
de madera
que al estar
sobre la viga
collar fun-
ciona como
diafragma.
Fotografías
del autor.



Fig 69,70 Viga
collar sobre muros y
vanos que mantiene
unidas las esquinas
portantes de tierra
apisonada. Entre-
piso de pajarcilla
como desplante
del siguiente nivel.
Obras en Proyecto
San Isidro. Fotogra-
fías del autor.

3.3.2 Influencia del peso en la estructura

Entre los factores que contribuyen al **aumento de la vulnerabilidad sísmica** de la construcción con tierra, la mayoría guardan **relación directa con los elementos horizontales**, por lo que se dice que las edificaciones de tierra de 2 niveles (o más) presentan una mayor vulnerabilidad ante acciones horizontales como los sismos. Los factores mencionados son los siguientes: uso de materiales no compatibles, entrepisos pesados, ausencia de diafragmas, apoyo y anclaje inadecuado de elementos de entrepiso y cubiertas sobre los muros, entrepisos muy flexibles y una estructuración de cubierta deficiente ¹⁰¹.

En cuanto a la **influencia del peso de los entrepisos y cubiertas** en la vulnerabilidad de las construcciones con tierra no existe un consenso entre los especialistas en la materia, algunos sostienen que el peso agrava la fuerza sísmica y por tanto **deben buscarse elementos ligeros**, mientras que otros sostienen lo contrario, que la presión que ejerce la cubierta (o entrepiso) sobre los muros, es necesaria para que

⁹⁹ Patricio Cevallos Salas, "La construcción con tierra en el Ecuador y la necesidad de la norma", *Memorias 15 SIACOT "Tierra, sociedad, comunidad"*, 2015, 603–14.

¹⁰⁰ Michiels y Fonseca Ferreira, "Técnicas de estabilización sismorresistente para mejorar el comportamiento estructural de edificios históricos de tierra".

¹⁰¹ Luis Eduardo Yamin Lacouture et al., "Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada", *Apuntes. Revista de estudios sobre patrimonio cultural* 20, núm. 2 (enero de 2007): 286–303.

estos se mantengan juntos ante un evento sísmico. Sin embargo, a partir de un trabajo realizado por Natalia Jorquera ¹⁰² se concluyó que el peso de la cubierta sí **aplasta los muros, provocando su colapso**. Además de encontrar que la viga de amarre o cadena, en conjunto con el entrepiso o cubierta realiza la función de distribución y unión de los muros.

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 ¹⁰³. Para esto se ocupan collares o cadenas de arrastre. Estos elementos se deben ensamblar adecuadamente a los muros y con especial atención en las esquinas y encuentros de muros, la idea es que **tanto el entrepiso como la cadena trabajen en conjunto** como un diafragma ¹⁰⁴.

102 Natalia Jorquera Silva, “Culturas sísmicas en tierra. Estrategias locales de respuesta de la arquitectura de tierra chilena”, *Memorias 13 SIACOT “Material universal, realidades locales”*, agosto de 2013, 19–31.

103 Julio Vargas Neumann, “Consideraciones para incluir la técnica del tapial en la normativa de tierra peruana”, *Memorias 13 SIACOT “Material universal, realidades locales”*, agosto de 2013, 885–95.

104 Guerrero Baca, “Arquitectura de tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva”.



4. MATERIALES

4. MATERIALES

4.1 MADERA

4.1.1 Estructura

La **integración de estructuras de madera** en las construcciones con tierra es una **práctica común**, ya que son **materiales compatibles por sus características físicas**, además de que ambos son relativamente fáciles de obtener en casi todas las zonas del país ¹⁰⁵. Además de ser un producto renovable, si se produce de forma legal y controlada, comparado con otros materiales industrializados requiere poca cantidad de energía durante su producción y la emisión de gases de efecto invernadero es poca ¹⁰⁶.

La **pajarcilla** al ser una técnica de entramado, **trabaja en conjunto con la estructura de madera** para absorber las deformaciones causadas por las distintas cargas a las que está sometida una edificación. Sin embargo, por ser la estructura principal, es importante recalcar que la **madera debe ser capaz de soportar los requerimientos estructurales por su cuenta** y sin necesidad del relleno o acompañamiento de la tierra ¹⁰⁷. Lo anterior, ofrece una ventaja cuando se trata de evaluarla bajo los reglamentos de construcción en México, ya que este material, a diferencia de la tierra, sí se contempla en la normativa por lo que, **a partir de la estructura de madera se determinarán los requerimientos de carga** para el entrepiso.

En primera instancia y aunque esta investigación se avoca únicamente al sistema de entrepiso, se debe identificar el **tipo de estructura** donde se desplantará la propuesta. Dentro de la clasificación de las estructuras establecida en el Artículo 139 del Título Sexto del Regla-



Fig 71 Cadena de madera que recibe viguetas para entrepiso de pajarcilla. Fotografía del autor.



Fig 72 Interacción de la estructura de madera con la pajarcilla en muro y entrepiso. Fotografía del autor.



Fig 73 Vista inferior del entrepiso de pajarcilla. Fotografía del autor.

¹⁰⁵ Michiels y Fonseca Ferreira, “Técnicas de estabilización sismorresistente para mejorar el comportamiento estructural de edificios históricos de tierra”.

¹⁰⁶ Alleck J. González Calderón y Luis Fernando Guerrero Baca, “Bajareque contemporáneo para climas semi-áridos. Sistema alternativo para la vivienda rural de Torreón, México”, *Memorias 20 SIACOT “Revive la tierra”*, abril de 2022, 537–47.

¹⁰⁷ Franz Volhard, “Building with timber and earth”, en *Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth*, English (Basel: Birkhäuser, 2016), 15–30.

mento de Construcciones para la Ciudad de México ¹⁰⁸, la propuesta se aplicaría en **estructuras del subgrupo B2**, por estar enfocada a aplicarse en **casa habitación**.

Al buscar normas enfocadas al uso de la madera en entrepisos, las **NTC** sobre criterios y acciones para el **diseño estructural de las edificaciones** cuentan con el término de **“sistema de piso ligero de madera”** definido como “aquéllos formados por tres o más miembros aproximadamente paralelos y separados entre sí no más de 800 mm y unidos **con una cubierta de madera** contrachapada, de duelas de madera bien clavadas u **otro material que proporcione una rigidez equivalente**” ¹⁰⁹.

Como se mencionó en el primer capítulo, a pesar de contar con investigaciones que reportan las características mecánicas de técnicas similares, esta evidencia resulta **insuficiente para considerar que la pajarcilla satisface esos requerimientos**. Sin embargo, para despejar estas dudas, las **NTC sugieren realizar pruebas de carga** ya sea sobre prototipos, o modelos que produzcan fielmente las condiciones reales. Además, se sugiere que el método de ensaye se defina específicamente para cada caso ¹¹⁰.

Se consideró **no realizar pruebas a las vigas de madera de forma aislada**, ya que estos elementos ya cuentan con validez estructural en la normatividad. Esto se cumple **tomando en cuenta los criterios de diseño** tales como la separación entre vigas, así como las dimensiones de estas en función de la carga a la que estará sometido el entrepiso. **Únicamente se evaluará la estructura de madera en conjunto** con las piezas prefabricadas y la capa de compresión. Esto, como lo menciona la norma, se puede realizar **por métodos experimentales o teóricos** ¹¹¹.

4.2 TIERRA

4.2.1 Definiciones

Usualmente se suele **confundir al suelo y la tierra**, de hecho, existen fuentes que usan indistintamente estos dos términos. Dentro del mismo campo de la arquitectura de tierra muchas veces se hace referencia a la tierra como suelo, generando algunas confusiones en cuanto al enfoque desde donde se va a abordar este material. Por lo anterior, se decidió hacer una aclaración sobre qué se entenderá en este trabajo como tierra y la diferencia con el suelo, ya que se ha encontrado que **sí existe una diferencia significativa cuando se aborda desde la arquitectura de tierra**.

108 Secretaría de Desarrollo Urbano y Secretaría de Obras y Servicios, “Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo”, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal § (2017).

109 Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda y Secretaría de Obras y Servicios, “Normas Técnicas Complementarias Sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones”, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal § (2017).

110 Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda y Secretaría de Obras y Servicios.

111 Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda y Secretaría de Obras y Servicios.

El suelo puede entenderse desde diferentes disciplinas. Para la **agricultura** es la capa donde tiene lugar la mayor parte de las acciones biológicas y donde se planta ¹¹², desde la **ingeniería civil y la geología** es un sedimento sin consolidar, formado por fragmentos de rocas que puede o no contener materia orgánica u otros minerales como sales solubles ¹¹³. Por otro lado, para los **edafólogos** es una entidad natural tridimensional resultado de un proceso de alteración en la superficie inmediata de la Tierra (planeta) ¹¹⁴.



Fig 74 Suelo en agricultura. Fotografía del autor.



Fig 75 Suelo para desplante de construcción en ingeniería. Fotografía del autor.



Fig 76 Suelo erosionado en edafología. Fotografía del autor.

Por otro lado, al hablar de la **tierra utilizada como material de construcción**, esta ha recibido distintos nombres. Desde un término científico se le denomina tierra a la **mezcla de arcilla, limos, arenas y en algunas ocasiones grava o piedras** ¹¹⁵. Cuando se refiere a **elementos constructivos** se les encuentra como **adobes o bloques de barro** ¹¹⁶ (en literatura en idioma inglés es común confundir el elemento constructivo con el material, ya que en muchas ocasiones se encuentra el término “adobe brick” tomando el **barro como un sinónimo de adobe**).

Usualmente se suele emplear el término “**arcilla**” para la tierra empleada en la construcción. Esto es erróneo, ya que la arcilla solo **es un componente de la tierra**, acompañada por los limos, arenas, gravas, aire y agua. Y es justo esta **variabilidad en la cantidad de arcilla** de cada tierra por la que no todas las tierras usadas en construcción pueden ser usadas para cualquier técnica constructiva y, por tanto, cobra importancia su caracterización previa ¹¹⁷.

Aunque actualmente la diferencia entre suelo y tierra resulte poco clara, en la tradición constructiva que se llegó a desarrollar en la **época prehispánica se di-**

¹¹² Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, “1. Generalidades”, consultado el 28 de noviembre de 2022, https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s01.htm#2a.

¹¹³ Daniel Santibáñez R., “Compendio de normas chilenas de mecánica de suelos”, 2018.

¹¹⁴ Nora Adriana Pérez Castellanos, “Los adobes de la gran pirámide de Cholula: una mirada desde la ciencia e ingeniería de materiales”, en *Arquitectura Mesoamericana*, 1ra edición (Ciudad de México: Instituto de Investigaciones Antropológicas. Universidad Nacional Autónoma de México, 2021), 143–68.

¹¹⁵ Gernot Minke, “The properties of earth as building material”, en *Building with earth. Design and technology of a sustainable architecture* (Berlin: Birkhäuser, 2006), 19–35.

¹¹⁶ Minke.

¹¹⁷ Wilfredo Carazas Aedo y Cooperación Comunitaria, “Materia prima”, en *Construir con bajareque cerén. Experiencias en el contexto de Oaxaca, México*, 1ra edición (Ciudad de México: a+terre ediciones, 2021), 20–41.

ferenciaban estos dos conceptos. En el caso de la cultura nahua, se tenía clara la diferencia entre **suelo kallali** (donde se desplanta o asienta la casa) y la llamada **te-sokiti** (tierra para construir) ¹¹⁸.

A partir de las definiciones dadas y a fin de aclarar las diferencias entre ambos términos, se entenderá por **suelo** al material dispuesto en la superficie terrestre **donde se desplantará la construcción**, mientras que la **tierra** será la mezcla de arenas, limos y arcillas que **se utilizará para construir**.



Fig 77 Diferencias entre suelo y tierra. Muro de adobe sobre suelo seco. Fotografía del autor.



Fig 78 Construcción de adobe sobre cimientos de piedra asentado sobre el suelo del terreno. Fotografía del autor.



Fig 79 Barda y contrafuertes de tapial para propiciar un mejor apoyo en el suelo. Fotografía del autor.

4.2.2 Composición

Como se ha mencionado, la **tierra es una mezcla de 3 o 4 componentes** ¹¹⁹. La separación de estos se hace a partir de su tamaño granulométrico. Comenzando por los componentes **más gruesos, las gravas** se encuentran entre los **3-20mm** y aunque estos ayudan a conformar la estructura portante, en la mayoría de las técnicas constructivas, **suelen ser suprimidas**.

Las **arenas**, aunque **no tienen cohesión** alguna, sí presentan estabilidad al oponerse a los desplazamientos de los componentes finos por la fricción entre sus caras, su tamaño va de **0.05-3mm**. La **parte fina de la tierra** se compone de **limos y arcillas**. Los primeros, se pueden entender como una arena muy fina, sin cohesión y sin capacidad de retención de agua. Sin embargo, es **aconsejable la presencia de diferentes tamaños de grano** en las tierras, ya que esto ayuda a que, por la diferencia de tamaños, las arcillas quedan rodeadas de los limos, que a su vez se intercalan entre las arenas, dando como resultado **mezclas más estables** ¹²⁰.

Ahora bien, se puede decir que la **arcilla** tiene el papel protagónico en la tierra por su **capacidad aglutinante**, pero también es el **más inestable** de los componentes. Esto debido a su forma y organización de sus minerales, que son muy **sensibles ante los cambios de humedad**, provocando que, al entrar en contacto con el agua, estos se “activen” y por la carga electrostática que le dota el agua, se genera

¹¹⁸ Andrea Rodríguez Figueroa y Leopoldo Valillas Coalla, “Materiales para la construcción de las casas nahuas”, en *Arquitectura en el código Florentino y los primeros memoriales*, vol. 2, s/f, 5–49.

¹¹⁹ Carazas Aedo y Cooperación Comunitaria, “Materia prima”.

¹²⁰ Alejandra Caballero Cervantes y Luis Fernando Guerrero Baca, “Materiales constructivos”, en *Experiencias de bioconstrucción: conceptos generales y visiones desde México*, 1ra edición (Ciudad de México: Bonilla Artigas, 2021), 21–50.

en los cristales un efecto de **repulsión (expansión)** y que conforme se va secando, estos cristales comienzan a atraerse de vuelta presentando el agrietamiento por contracción característico de la arcilla ¹²¹.

Como **roca natural está compactada**, pero tiene la propiedad de poder ser **plástica y dúctil** cuando se le agrega **agua**. En teoría, se dice que la arcilla es impermeable, pero la realidad es que es finamente higroscópica, gracias a sus poros con diámetro aproximado de 50micras, lo que da lugar a la ascensión capilar del agua entre las láminas que la componen¹²².

La propiedad de **pasar de un estado endurecido y compactado a uno plástico con cierta ductilidad**, que sucede cuando la arcilla entra en contacto con el agua, se da por dos razones donde intervienen la unión fisicoquímica de sus partículas. La primera causa es el **grado de finura** de los granos de arcilla, al ser inferiores a las 2 micras, así como una **hidrofilia muy alta**. Otra causa de la plasticidad tiene que ver con la **morfología y la naturaleza capilar**, la arcilla pura (ej. caolinita) está compuesta en su mayoría de silicatos de aluminio hidratados y cristalizados en formas de microcristales monoclinicos hexagonales, como finas láminas formadas paralelamente una de la otra.

El **agua transmitida capilarmente** busca insertarse en los espacios reducidos **entre cada lámina**, abriéndose paso y tensionando la unión entre ellas, la cual al ser muy fuerte **mantiene la cohesión entre las distintas partículas de la tierra**. Cabe recalcar que esta cohesión se logra únicamente con líquidos que humedezcan los granos de la arcilla, como el agua, si se realiza con un líquido no polarizado y sin afinidad con la arcilla no se obtendrán pastas sin cohesión alguna ¹²³.

4.2.3 Clasificaciones

La **construcción con tierra** está **relacionada con las características** del material, ya sea que se seleccione el sistema de acuerdo con las cualidades de la tierra o se consiga material con las características necesarias para determinado sistema constructivo ¹²⁴. Resulta un error **nombrarla arquitectura de tierra** (en singular) cuando se sabe que **existen distintos tipos** de esta, los cuales estarán **determinados por sus características** (físicas, químicas, mecánicas, entre otras) y las proporciones de cada componente.

Cuando se intenta buscar **pruebas para conocer el tipo de tierra**, el panorama es disperso, ya que, aunque existen características específicas a estudiar, **no se cuenta con parámetros base, pruebas mínimas** establecidas ni mucho menos **datos cuantitativos**. Aunado a esto, la mayoría de las pruebas realizadas en la práctica

¹²¹ Caballero Cervantes y Guerrero Baca.

¹²² M. Duriez y J. Arrambide, *Nouveau traite de materiaux de construction tome II*, 2da edición, 1962.

¹²³ Duriez y Arrambide.

¹²⁴ United Nations Centre for Human Settlements (Habitat), "Fundamentals for soil science", en *Earth construction technology* (Nairobi: United Nations, 1992), 14–21.

constructiva responden a cualidades sensoriales, cuyos resultados pudieran estar sujetos a la interpretación del que realiza dichas pruebas. Por tal motivo **se determinó clasificar las pruebas** encontradas en la literatura en: pruebas **de campo** y pruebas **de laboratorio**, buscando por lo menos una de campo y de laboratorio para cada característica a estudiar para comparar los resultados obtenidos, así como **determinar el tipo de tierra** a partir de clasificaciones existentes.

Un ejemplo de esto se encuentra en la zona nahua del **México prehispánico**, donde la **clasificación** no se hacía abajo rigor científico, más bien **a partir del uso** de esta. *Tesokitl* (tierra para construir las casas) cambiaba de nombre dependiendo de su uso. Algunas variaciones son: *tlaltsakwtli* que era la **tierra negra** utilizada para **hacer barro y adobes**, mientras que la tierra **mezclada con cal y vendida para edificar** las casas era nombrada *tesontlalli*. Otra variante era la **tierra blanca atisatl**, utilizada para **fabricar adobes ligeros** y para **construir los tapancos** de las casas se utilizaba la *tlapantlalli* ¹²⁵.

Parte de la **confusión** que generan ambos términos (**tierra-suelo**) se ha visto reflejado en la manera en que se estudian, al usarlos de manera indiferente, permite **tomar como base las clasificaciones** y procesos que **se aplican a los suelos** en geología, para caracterizar la tierra. Esto debido a que la tierra, previo a ser usada para la construcción, **se encuentra en el suelo** y sus características fisicoquímicas dependerán del tipo de roca del cual se originan, como del clima y otros factores, por lo que, así como existen distintos tipos de suelo pueden ser las tierras ¹²⁶. Para esto existen clasificaciones como la **Clasificación Única de Suelos (SUCS)** que desde su composición los separa en dos grandes grupos: **suelos de grano fino y suelos de grano grueso**. Con los suelos de grano fino se determinan los límites de consistencia y con estos se **diferencian entre orgánicos, limosos o arcillosos**, sean de alta o baja plasticidad.

4.3 ESTABILIZANTES

La **tierra ha sido utilizada en combinación con otras sustancias** y elementos estructurales debido a que se identifica como un material con poca resistencia a



Fig 80 Tierra para edificar casas, tesontali. Tomado de "Arquitectura en el código Florentino" de Rodríguez A. y Valillas L.



Fig 81 Tierra para tapancos, tlapantlalli. Tomado de de Rodríguez A. y Valillas L.

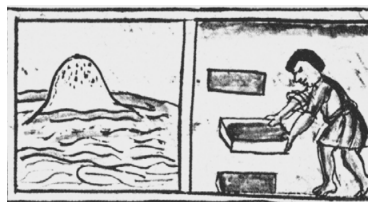


Fig 82 Tierra blanca para adobes, atisatl. Tomado de Rodríguez A. y Valillas L.

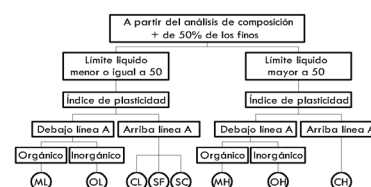


Fig 83 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Elaboración propia a partir de FAO s/f.

¹²⁵ Rodríguez Figueroa y Valillas Coalla, "Materiales para la construcción de las casas nahuas".

¹²⁶ Josune Hernández Pocero, "Construcción con tierra. Análisis, conservación y mejora. Un caso práctico en Senegal" (2016).

esfuerzos mecánicos. Lo anterior ha generado **diversas técnicas de construcción** con tierra, donde la interacción de los agregados con la tierra desarrolla un “trabajo en red” ¹²⁷ **para responder a los esfuerzos** a los que estará sometido determinado elemento.

La estabilización permite **modificar la tierra** para **obtener las propiedades** que se buscan para determinada aplicación. Pero previo a que este proceso se ejecute es necesario conocer las propiedades originales de la tierra y así establecer que estabilizante se agregará con base en las características buscadas ¹²⁸. Si bien las **propiedades que se logran con la estabilización dependerán del agregado**, éstas pueden resumirse en: **impermeabilización** de la tierra a partir de la reducción de los poros y **reacomodo de las partículas**, reduciendo así la erosión; y el **aumento de las resistencias mecánicas** de la tierra, ya sea a compresión o tensión.

A partir del origen de los agregados, la estabilización se puede dividir en:

1. Estabilización **homogénea** cuando se le **adiciona algún elemento** de baja o nula presencia en la tierra analizada, pero que **naturalmente sí podría llegar a encontrarse** en otras tierras.
2. Estabilización **heterogénea** que es cuando la tierra se mezcla con componentes **ajenos a su condición natural** ¹²⁹.

El centro de las Naciones Unidas para los asentamientos humanos ¹³⁰, propone una clasificación tripartita para los distintos estabilizantes de acuerdo con el **proceso que se sigue para ser aplicado**.

- a) La estabilización **mecánica** donde gracias a la **compactación se modifica la densidad** del suelo y con esto aumenta su **resistencia mecánica** por el reacomodo de sus partículas.
- b) La estabilización **física** se puede dar a partir de **controlar su granulometría** o aplicar calor, frío o incluso electricidad, con lo anterior se logra **modificar** las condiciones de la tierra desde su textura, **peso volumétrico o densidad**, dotándola así de otras cualidades estructurales.
- c) La estabilización **química** se da cuando el **agregado logra modificar** sus **propiedades físicas** a partir de reacciones químicas, creando un **nuevo material**.

A esta clasificación se agrega la propuesta por Cárdenas Guillén ¹³¹ donde aborda:

¹²⁷ Luis Fernando Guerrero Baca, “Sistemas constructivos, medio ambiente y preservación del patrimonio arqueológico de tierra”.

¹²⁸ United Nations Centre for Human Settlements (Habitat), “Fundamentals for soil science”.

¹²⁹ Guerrero Baca, “Arquitectura de tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva”.

¹³⁰ United Nations Centre for Human Settlements (Habitat), “Fundamentals for soil science”.

¹³¹ Juan Martín Cárdenas Guillén, “Estabilización de tierra por métodos tradicionales”, en *Construcción con tierra estabilizada* (Editorial escuela del hábitat, UASLP, 1994), 25–28.

- d) La **estabilización por armazón** en la que se le **agrega a la tierra alguna fibra** la cual forma una estructura mecánica que impide grandes variaciones en el volumen, al momento del secado y contrarresta los efectos de erosión por viento y lluvia.
- e) La estabilización **por cementación** donde como su nombre lo indica, se hace una **mezcla de cemento y tierra**. Si bien esta podría entrar dentro de la química, se hace una diferenciación ya que es de las que más se ha llevado a la práctica, pero por la cantidad de agregado que se requiere, lo único que se está logrando es un **concreto pobre**.
- f) La estabilización **por impermeabilización** que tiene por finalidad hacer inalterable la masa de tierra ante la presencia de agua. Los agregados más comunes para este caso son **emulsiones asfálticas**.



Fig 84 Diagrama de características buscadas a partir del tipo de estabilización. Elaboración propia.

4.3.1 Fibras

La fibra en las mezclas de tierra debe verse como un **reforzamiento estructural** similar a la grava en el concreto. Este método de estabilización puede ser usado en diversas ejecuciones, **usando la tierra en estado líquido o plástico** e incluso en elementos compactados o bloques donde la arcilla tiende a reducir su tamaño tras el secado. **La fibra reduce el encogimiento de la tierra y ayuda al secado de la mezcla** gracias a que funciona como conductor de aire al interior, pero esto también aumenta la absorción de humedad. Una de las propiedades más importantes que aporta a la mezcla de tierra es el **aumento en la resistencia a tensión** al tiempo que **reduce su densidad** ¹³².

Aunado a esto, la mezcla puede adquirir un **aumento en la resistencia a compresión de al menos 15%**, el cual dependerá de la cantidad de fibra utilizada, la resistencia de compresión de la tierra, la resistencia a tensión que presente la fibra y la fricción que ésta presente con la tierra. Para **regiones sísmicas**, los bloques estabilizados con fibra son una opción **adecuada debido a la cantidad de energía que logra absorber previo a la falla**, en comparación con aquellos bloques únicamente de tierra ¹³³.

¹³² United Nations Centre for Human Settlements (Habitat), "Characteristics of soil stabilizers", en *Earth construction technology* (Nairobi: United Nations, 1992), 22–34.

¹³³ United Nations Centre for Human Settlements (Habitat).

La resistencia a compresión de la tierra es uno de los criterios a tomar en cuenta cuando se busca estabilizar por armazón o de forma química, por consiguiente, **la tierra estabilizada con fibra** no deberán ser expuestos a **presiones mayores a 3kgf/cm²** y en el caso de estabilizarse con **minerales el límite será a 5kgf/cm²**. Aunque estos criterios han sido resultado de diversos estudios realizados en Europa y han comprobado funcionar en diversos proyectos, podrá existir el caso de tener algunos suelos que no alcancen dichos límites ¹³⁴.

Cómo se mencionó, estas características dependerán tanto de la cantidad de fibra agregada, así como de las características de esta. Por tal motivo existe un **límite de cantidad de agregado que**, de ser rebasado, dichas características se ven afectadas debido a la reducción de los puntos de contacto entre la tierra y la fibra. **Se habla de 4% de fibra en relación con el 1** volumen de tierra (20-30kg/m³ de tierra). Mientras que el **tamaño de la fibra** deberá ser, preferentemente entre los **4-6cm**, dispersa en la mezcla en todas direcciones y **bien distribuida** ¹³⁵.

4.3.2 Estabilizantes

Los efectos de la cal en la tierra dependerán de los contenidos y composición de estos, p.ej. en **tierras con alto contenido de materia orgánica** los beneficios mecánicos son limitados, pero puede ayudar a reducir la proliferación de hongos durante el secado de la mezcla. Sin embargo, el **efecto suele ser más efectivo en suelos arcillosos**. Y dentro de las arcillas, se ha observado que las reacciones se logran de manera más efectiva cuando se usa con montmorillonita, donde se reduce su plasticidad, mientras que con caolinita el efecto es menor. De acuerdo con las aplicaciones e investigaciones realizadas, **este tipo de estabilización es adecuada para la ejecución de elementos compactados** ¹³⁶.



Fig 85 Pasta de cal utilizada en la experimentación. Fotografía del autor.

Las **características que se persiguen al utilizar la cal** como estabilizante se dan gracias a la absorción de agua producto de la reacción exotérmica y la demanda de agua de la cal, el intercambio de iones entre la cal y la tierra que produce una floculación, posteriormente una carbonatación y finalmente la **reacción puzolánica** que es la que **dota de mayor resistencia a la mezcla** resultado de la reacción entre el calcio y la sílice junto con la alúmina para consolidar ambas partes ¹³⁷.



Fig 86 Revoltura de la pasta de cal, tratando de omitir el agua superficial. Fotografía del autor.

¹³⁴ United Nations Centre for Human Settlements (Habitat), "Principles for soil stabilization", en *Earth construction technology* (Nairobi: United Nations, 1992), 14–21.

¹³⁵ United Nations Centre for Human Settlements (Habitat), "Characteristics of soil stabilizers".

¹³⁶ United Nations Centre for Human Settlements (Habitat).

¹³⁷ United Nations Centre for Human Settlements (Habitat).

Para que esta reacción se dé adecuadamente se debe agregar **la cal en la cantidad adecuada** con la finalidad de **mantener un pH alto**. Por tanto, se conoce que al **agregar 1% de cal viva** (Óxido de calcio) la reacción que se provoca **seca la tierra**, cuando se agrega entre **2-3% la cal reduce la plasticidad de la tierra** y comienza a romper los grumos. **En la práctica común se utiliza entre un 6-12%**. Un aspecto importante es el porcentaje de óxido de calcio que contiene la cal que se ocupará, donde los procesos industrializados logran entre el 90-99% mientras que en procesos menos sofisticados puede estar alrededor del 60% ¹³⁸.

Otro agregado común en la construcción con tierra es **el nopal o en su defecto el mucílago** proveniente de este, este se utiliza **cuando se busca aumentar la cohesión de la tierra**, en caso de que esta sea poco arcillosa, **así como hacerla parcialmente impermeable**. Para eso, lo que tradicionalmente se realiza es trocear las pencas de nopal y colocarlas dentro de un recipiente con agua hasta que esta se comience a tornar espesa y pegajosa debido al mucílago que desprende la pulpa del nopal. Pero se ha reportado que esta técnica de extracción presenta inconvenientes como la rápida fermentación que acorta la vida útil del mucílago y dificulta su almacenamiento, así como la incertidumbre que se tiene en cuanto a la cantidad de mucílago y la relación con el agua, por lo que **se retomó el método de extracción en seco y el porcentaje de mucílago** utilizados en la serie de experimentos dirigidos al desarrollo de procesos para el mejoramiento de revoques de tierra de Ávila, Guerrero y Tepale ¹³⁹.



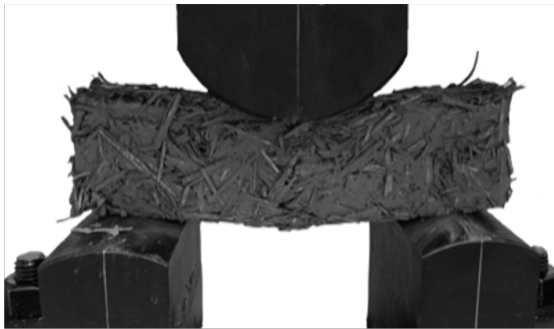
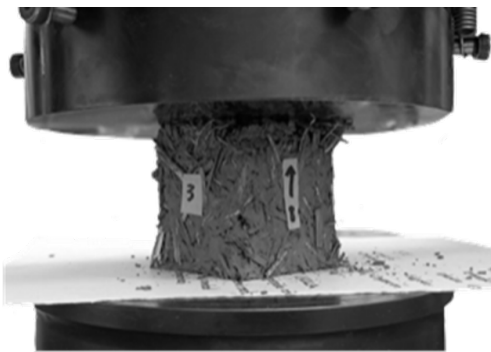
Fig 87 Corte de la penca de nopal para la extracción de mucílago. Fotografía del autor.



Fig 88 Extracción "en seco" del mucílago de nopal. Fotografía del autor.

138 United Nations Centre for Human Settlements (Habitat), "Principles for soil stabilization".

139 Esmeralda Ávila Boyas, Luis Fernando Guerrero Baca, y Blas Antonio Tepale Gamboa, "Recubrimientos de tierra estabilizada con cal y mucílago de Opuntia ficus para la protección de superficies de tapia", *Memorias 19 SIACOT "Conservación sostenible del paisaje: tierra y agua"*, octubre de 2019, 138–49.



5. ESTRATEGIA DE TRABAJO

5. ESTRATEGIA DE TRABAJO

Para cumplir el objetivo principal **se requiere conocer el desempeño mecánico** de la propuesta de entrepiso ya que, aunque la prefabricación estaría resolviendo el problema original, **su implementación** en la construcción se seguiría viendo **limitada al no poder validar la propuesta** desde la parte estructural. Aun cuando se cuenta con investigaciones donde se reportan resistencias de algunas técnicas similares como el bajareque o el adobe, 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 que, **la evaluación particular de la pajarcilla y de sus componentes, se vuelve vital.**

Ante los problemas de regulación que existen con respecto a la aplicación y métodos de prueba de la tierra, se optó por **tomar como referencia los 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 los esfuerzos a los que eran sometidas las propuestas tecnológicas, **destacando las pruebas a compresión y flexión** por ser los esfuerzos a los que está sometido un sistema de entrepiso o cubierta, por lo que se filtró del catálogo de normas del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE)¹⁴⁰, aquellas que evaluaran materiales a flexión. Algunos principios de diseño y evaluación fueron tomados a partir de **casos análogos como el adobillo**¹⁴¹, **el machimbloque**¹⁴², **los hourdiblocks**¹⁴³, **el sugarcrete**¹⁴⁴ **y el domotej**¹⁴⁵.



Fig 89 Prueba en campo del hourdi block 400. Tomado de Auroville Earth Institute, 2022.



Fig 90 Prueba en laboratorio del Domotej. Tomado de Castañeda Nolasco.



Fig 91 Evaluación empírica del sugarcrete. Tomado de Gutiérrez et al. 2022.

¹⁴⁰ Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., “Catálogo de Normas ONNCCE” (Ciudad de México: ONNCCE, 2023).

¹⁴¹ Valentina Dávila Urrejola and Javiera Contreras Silva, “¿Qué Es El Adobillo?” in *El Adobillo*. Cultura Constructiva de Valparaíso, ed. Alvaro Riquelme Bravo, 2da edición, 2022, 11–19.

¹⁴² Raúl Sánchez Mora, “Machimbloque de Tierra Comprimida Estabilizada,” in *Tercer Simposio CIB/RILEM* (México D.F.: SECOFI, 1983).

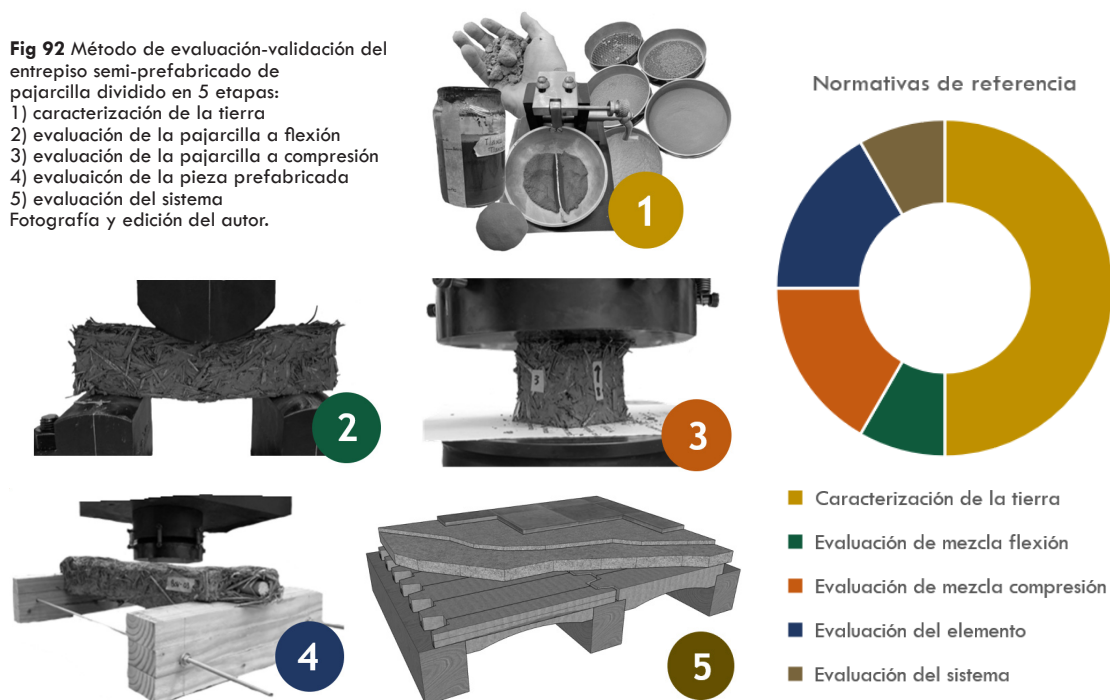
¹⁴³ Auroville Earth Institute, “Hourdi Roofing,” Architecture, accessed November 12, 2022, <https://dev.earth-auroville.com/hourdi-roofing/>.

¹⁴⁴ Armor Gutierrez et al., “Sugarcrete. Slab Report” (London, November 7, 2022), <https://uel.ac.uk/sites/default/files/uel-sugarcrete-slab-report---7-nov-2022.pdf>.

¹⁴⁵ Castañeda Nolasco, “Evaluación de la tecnología para techos Domotej”.

A partir de este análisis se concluyó que, **para probar el objetivo principal**, se debe comenzar desde (1) la **caracterización de tierra**, pasando por, (2) la **evaluación** del material a **flexión** y (3) a **compresión**, lo que dará paso a la determinación de la mezcla a utilizar y (4) **probar en las piezas modulares** y la capa de compresión, para concluir con (5) **la validación del entrepiso**, por lo que el diseño del sistema irá respondiendo a los resultados de cada etapa, buscando cumplir con lo solicitado en la norma nacional.

Fig 92 Método de evaluación-validación del entrepiso semi-prefabricado de pajarcilla dividido en 5 etapas:
1) caracterización de la tierra
2) evaluación de la pajarcilla a flexión
3) evaluación de la pajarcilla a compresión
4) evaluación de la pieza prefabricada
5) evaluación del sistema
Fotografía y edición del autor.



Al **evaluar primero el material**, se puede **comprender la influencia mecánica de los distintos agregados** que puede llevar la pajarcilla y modificar sus concentraciones conforme los resultados que se van obteniendo. Dentro de las ventajas que se tienen por ser un prefabricado, es que **la evaluación de los elementos modulares** se realiza **lo más parecido a su disposición final**, contrario 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.

Lo que se busca al **proponer un método de evaluación** y no solo resistencias o parámetros a cumplir, es abrir el panorama con relación a las tierras, entender que no existe una sola tierra para construir, sino que son muchas y muy diferentes entre ellas. Evidentemente hay tierras más adecuadas para unas técnicas que para otras, por lo que ninguna es mejor o peor, simplemente habrá que **descubrir de qué forma o bajo qué parámetros la tierra** con la que se cuenta al alcance de la mano **puede servir para cubrir las necesidades de hábitat en la actualidad**, en este caso, para construir un entrepiso de pajarcilla.

5.1 TIERRA

La construcción con tierra está relacionada con las características del suelo. **Al existir diversas tierras**, resulta **necesario conocer las características** de la tierra con la que se trabaja. Ante un panorama disperso en cuanto a qué ensayos se deben ejecutar, se hizo un **compendio de pruebas de campo y laboratorio**, utilizadas para clasificar suelos y caracterizar tierras. Basado en la recopilación, análisis y síntesis de la bibliografía consultada se seleccionaron aquellas que tuvieran una equivalente en laboratorio y campo.

Las **pruebas de campo han acompañado a la construcción con tierra**, por lo que existe una **relación directa** entre los resultados obtenidos y su **aplicación en algún sistema constructivo**. Es importante entender que se requiere experiencia para tener un criterio adecuado en la interpretación de los resultados de estas pruebas. Por otra parte, **las de laboratorio** son tomadas de **otras ramas como la geotecnia** o la mecánica de suelos, de las cuales, se obtienen datos cuantitativos, con la aclaración que estos **estudian el suelo y no la tierra** como un material constructivo.

Si bien, en las **pruebas de laboratorio también influye el factor humano**, la interpretación tiene un efecto menor en los resultados, por lo que se buscará **correlacionarlos** con las pruebas de carácter cualitativo, ya que en la construcción con tierra y basado en la experiencia de la técnica, la mayor parte de los procesos, tanto de experimentación como constructivos se **evalúan desde la percepción**.

A evaluar:	Pruebas de laboratorio (PL)		Prueba de campo (PC)	
	Prueba	Norma	Prueba	Referencia
Preparación	0. Preparación en laboratorio	NMX-C-416-ONNCE-2003 cap.3	0. Preparación en campo	NMX-C-416-ONNCE-2003 cap.2
Clasificación		Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS	1. Consistencia seco	Consistencia del suelo FAO
			2. Corte de esfera	Construcción con tierra Gernot Minke
			3. Sacudimiento	Consistencia del suelo FAO
			4. Bola-rollo-bola	Construcción con tierra Gernot Minke
Composición	5. Tamizado	NMX-C-416-ONNCE-2003 cap.5	6. Tamizado	Práctica constructiva
	7. Sedimentación	NMX-C-416-ONNCE-2003 cap.12	8. Sedimentación	Notas sobre bioconstrucción Proyecto San Isidro
Consistencia	9. Límite Líquido	NMX-C-416-ONNCE-2003 cap.6	10. Límite Líquido	Det. Límites líquido y plástico del suelo LMSE 11
	11. Límite Plástico	NMX-C-416-ONNCE-2003 cap.7	12. Límite Plástico	
Contracción			13. Contracción cuadrada	Det. Límites de contracción LMSE 11
Cohesión	14. Prueba 8	Building with light earth Franz Volhard	15. Churrometría	Construir con bajareque cerén Cooperación Comunitaria

Tab 2 Pruebas de laboratorio y campo a realizar para la caracterización de tierras. Elaboración propia.

Ante la falta de unificación de resultados o pruebas mínimas, se presenta, a modo de síntesis, un **listado de características** que la mayoría de la literatura recomienda **analizar de las distintas tierras** para su aplicación en la construcción. Este compendio de pruebas no se debe entender como una lista definitiva de pruebas o parámetros a cumplir, ya que se trata de una propuesta base sobre la cual puede

sufrir alteraciones y/o modificaciones. Para mayor detalle sobre los procedimientos y pruebas realizadas revisar el “**Anexo 1: Manual de pruebas para determinar el tipo de tierra**”.

Para **cada tierra** analizada se repitió el **procedimiento en 3 ocasiones**, esto con la finalidad de comparar los resultados e identificar la variación y fiabilidad de los datos obtenidos. Los equipos y herramientas utilizadas para dichas pruebas se enlistan a continuación junto con su resolución e incertidumbre.



Fig 93 Equipos, herramientas e instrumentos utilizados en la caracterización de la tierra. Fotografía del autor.

Actividades	Equipos/Herramientas/ Instrumentos de medición	Escala	Alcance	Resolución	Incertidumbre
Caracterización de tierras					
Pruebas en general	Báscula digital	Digital	2-3000 g	0.1 gramo	0.1 gramo
	Tamizadora	Digital	-	-	-
	Báscula digital	Digital	2-3000 g	0.1 gramo	0.1 gramo
	Copa de casa grande	-	-	-	-
	Báscula digital	Digital	2-3000 g	0.1 gramo	0.1 gramo
	Regla/vernier	Análogica	0.05-120mm	0.05mm	0.05mm
	Báscula digital	Digital	2-3000 g	0.1 gramo	0.1 gramo
	Regla/vernier	Análogica	0.05-120mm	0.05mm	0.05mm

Tab 3 Equipos, herramientas e instrumentos utilizados en la caracterización. Elaboración propia.

5.1.1 Preparación

El método de **obtención, envase, identificación, transporte y preparación** de las muestras en campo se aborda en el **capítulo 2 de la NMX-C-416-ONNCCE-2003**¹⁴⁶, donde se diferencia la muestra inalterada y alterada, estas últimas también se subdividen de acuerdo con la zona o profundidad de donde se obtienen. Además, se explica la prueba de **dilatancia, de la tenacidad y resistencia en seco**, cuyos procedimientos se asemejan a las pruebas de consistencia en seco, sacudimiento y bola-rollo-bola encontradas en la literatura enfocada a la arquitectura de tierra y abordadas en el apartado siguiente. Para la preparación de las **muestras en laboratorio** se tiene el capítulo 3¹⁴⁷ de la misma normativa. Este apartado se enumeran los procesos que van desde el **secado en horno, la disgregación manual y el cuarteo** de la muestra, todo esto para las muestras alteradas, para aquellas que se consideren inalteradas se debe seguir un procedimiento de mayor rigor.



Fig 94 Muestra de tierra. Fotografía del autor.



Fig 95 Tierra sin cribar. Fotografía del autor.



Fig 96 Tierra seca. Fotografía del autor.

146 Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., “2. Procedimiento de muestreo e identificación de muestras en campo” (2003).

147 Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., “3. Procedimiento para la preparación de las muestras de laboratorio” (2003).

5.1.2 Clasificación preliminar

Como se mencionó anteriormente, el capítulo 2 de la NMX-C-416-ONNC-CE-2003, contempla **pruebas de clasificación preliminar**, pero por ser a partir de características sensoriales y estar clasificadas como “**de campo**” se fusionaron en este apartado junto con la del corte de esfera. En cuanto a la clasificación de laboratorio no se tienen procedimientos como tal, pero se menciona la **Clasificación Única de Suelos** (SUCS por sus siglas en inglés) la cual, se vale de distintas pruebas, abordadas en los siguientes puntos, para clasificarlos en gravosos, arenosos, limosos o arcillosos.

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS

Este **método de clasificación** tiene sus bases en el sistema de clasificación de aeropuertos, propuesto en 1942 y adaptado por el cuerpo de ingenieros de Estados Unidos para la construcción de aeropistas. Tanto el SUCS como el de aeropuertos **divide los suelos en 2 fracciones**: el grano grueso y el fino, y ambos se valen de los límites de consistencia para ubicar el suelo analizado en el diagrama de Casagrande¹⁴⁸.

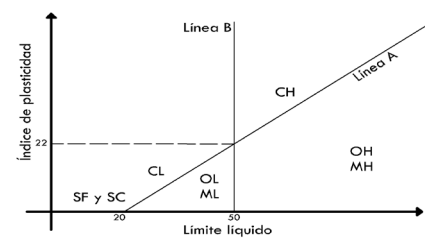


Fig 97 Carta de plasticidad utilizada en el Sistema original. Elaboración propia a partir de Juárez y Rico, 2005.

Dicho diagrama también conocido como “Carta de Plasticidad” **muestra que los suelos finos** no adoptan una distribución al azar, sino que **pueden ser agrupados** a partir de sus **características de plasticidad y propiedades mecánicas**. A partir de la línea inclinada A y la línea vertical B, la carta se divide en 4 zonas que dan paso a los 6 tipos de suelo considerados en la Clasificación Única de Suelos¹⁴⁹ que son: **arcillosos (C)**, **limosos (M)** y **orgánicos (O)**, cada uno subdividido en **alta (H) o baja (L) plasticidad**. Originalmente, Casagrande añadió 2 tipos más, incluyendo a los suelos **arenosos (S)** con excelente cementante arcilloso (C) o arenas finas que no califican dentro de esta categoría (F).

2-5. Pruebas de campo para caracterizar tierra

Se cuenta con diversidad de pruebas para identificar de forma rápida el tipo de tierra con el que se cuenta, dentro de ellas se seleccionaron:

-La **consistencia en seco**, que consta de tomar un puño de la tierra seca y se intenta romper presionando entre el pulgar y el índice, o en caso de ser necesario, con la palma de la mano. Con esto se **establece si la tierra tiene cohesión o no y la fuerza de esta**¹⁵⁰.

148 Eulalio Juárez Badillo y Alfonso Rico Rodríguez, “Granulometría en suelos”, en *Mecánica de Suelos Tomo 1. Fundamentos de la Mecánica de Suelos* (Limusa, 2005), 97–122.

149 Juárez Badillo y Rico Rodríguez.

150 Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, “6. Textura del suelo”, consultado el 28 de noviembre de 2022, https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm.

-Para el **corte de esfera** se toma una porción de tierra húmeda para hacer una bolita o esfera, inmediatamente se introduce una espátula o elemento delgado y se retira. La **adherencia de material** al elemento de corte **indica si es arenosa o arcillosa**¹⁵¹.

-El **sacudimiento** se realiza tomando una muestra de tierra mojada previamente y se forma una bola de 3-5cm de diámetro. Una vez logrado se sacude rápidamente de un lado a otro en la palma de la mano. La **velocidad de pérdida del brillo** (humedad) indica si la tierra es **arenosa o arcillosa**¹⁵².

-Por último, la prueba del **bola-rollo-bola o de tenacidad** consta de hacer un rollo de 3mm de diámetro y 10cm de longitud, si se logra o no dependerá de la **cohesión** y por tanto indica **presencia de arcilla**¹⁵³.

Las cuatro pruebas de campo permiten tener una **idea general del tipo de tierra** con la que se cuenta. Lo cual sirve para **discriminar tierras** que por sus características sensoriales y de acuerdo con la literatura, no sean las más adecuadas para la técnica constructiva seleccionada. Con pruebas fácilmente replicables y sin necesidad de herramienta especializada, se puede saber **si la tierra** que se está analizando tiende **hacia lo arenoso o lo arcilloso**.



Fig 98 Consistencia en seco. Fotografía del autor



Fig 99 Prueba del corte de esfera. Fotografía del autor.



Fig 100 Prueba de sacudimiento. Fotografía del autor.



Fig 101 Bola-rollo-bola. Fotografía del autor.

5.1.3 Composición

Entendiendo que la tierra es una **mezcla de arcilla, limo, arena, grava y piedras**, diferenciados por su tamaño granular¹⁵⁴, esta cualidad está **determinada por la distribución de los distintos componentes** y sus porcentajes de presencia. Para conocer la granulometría de determinada muestra se puede realizar por **tamizado o sedimentación**.

151 Minke, "Earth as a building material: the essentials".

152 Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, "6. Textura del suelo".

153 Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., 2. Proceso de muestreo e identificación de muestras en campo.

154 Minke, "The properties of earth as building material".

6,7. Tamizado

Consiste en **separar y clasificar por tamaños de partículas de suelo**, retenidas en una sucesión de mallas expresando las masas en porcentajes de muestra total¹⁵⁵. De acuerdo con la **NMX-C-416-ONNCCE-2013 capítulo 5**¹⁵⁶ donde se establecen las cribas a utilizar, y el procedimiento a seguir. En este caso el cribado se realizó con una **tamizadora vibratoria** marca Retsch modelo AS200 Control, con una **amplitud de 80 durante 4 minutos**, lo anterior por recomendación del Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales ya que la normativa solicita realizar el tamizado “por un periodo suficiente establecido por pruebas o controlados por medición en la muestra”.

Lo anterior puede **replicarse en campo**, tomando como referencia la norma anterior se **utilizan cribas para arena de aperturas similares a las de laboratorio**. En este caso el tamizado se realiza por medios manuales ya que la normativa indica que puede realizarse de esta forma siempre y cuando “después de finalizar, no más del 1% en peso del retenido de cualquier malla individual pueda pasar por esta malla durante 1 min de cribado manual continuo” ejecutado como lo indica la norma. Lo cual se logró **agitando las cribas durante 5 min**.

8,9. Sedimentación

En este caso se provoca la **separación** de las distintas partículas de suelo o tierra **gracias a la precipitación conforme transcurre el tiempo**. Esto puede realizarse de forma precisa y con equipo especializado a partir de lo indicado en el **capítulo 12 de la NMX-C-416-ONNCCE-2013**¹⁵⁷.

O bien, se puede ejecutar como se acostumbra a realizar en la **práctica constructiva**, tomando como referencia la prueba de sedimentación de **CRATerre** citado por Gernot Minke¹⁵⁸ y con el procedimiento seguido en el Curso de Inmersión en la Bioconstrucción del Proyecto San Isidro¹⁵⁹.

¹⁵⁵ Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., “5. Método de prueba para determinar el análisis granulométrico”, Pub. L. No. NMX-C-416-ONNCCE-2003 (2003).

¹⁵⁶ Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c.

¹⁵⁷ Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., “12. Método de prueba para la determinación del equivalente de arena en suelos y agregados finos” (2003).

¹⁵⁸ Minke, “The properties of earth as building material”.

¹⁵⁹ Alejandra Caballero Cervantes y Luis Fernando Guerrero Baca, “Curso de Inmersión en la Bioconstrucción” (Tlaxco, Tlaxcala, junio de 2021).



Fig 102 Tamizado en laboratorio. Fotografía del autor.



Fig 103 Tamizado en campo. Fotografía del autor.



Fig 104 Sedimentación en laboratorio. Fotografía del autor.

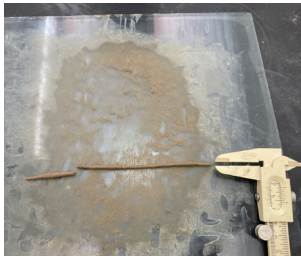
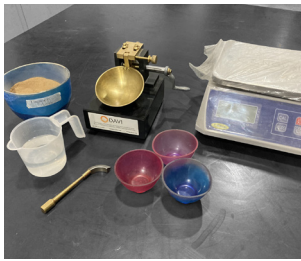


Fig 105 Sedimentación en campo. Fotografía del autor.

5.1.4 Consistencia

Los límites de Consistencia fueron **definidos por Albert Atterberg**, de ahí que muchas veces se conozcan también como “Límites de Atterberg”, cuya finalidad es **establecer los puntos** a partir de los cuales, el **suelo se deforma en presencia de cierto porcentaje de agua**. Por tanto, los límites están expresados de acuerdo con el porcentaje de agua con el que se logran las condiciones para cada límite.

Aunque originalmente eran nombrados como “Los **seis límites de consistencia**” para los suelos de grano fino, que comprendían: el límite superior de fluido viscoso, el límite líquido, el límite pegajoso, el límite de cohesión, el límite plástico y el límite de contracción, en la **actualidad únicamente** se refiere al **líquido y plástico**, ya que con estos se puede obtener el índice de plasticidad que es el que interesa para estos fines. En **algunas ocasiones** se continúa utilizando el **límite de contracción**¹⁶⁰.



Pruebas para obtener límites en laboratorio:
Fig 106 Materiales utilizados. Prueba de límite plástico. Copa de Casagrande para obtener límite líquido. Fotografías del autor.

Pruebas para obtener límites en campo:
Fig 107 Materiales utilizados. Prueba de límite plástico. Alternativa didáctica del LMSE para obtener límite líquido. Fotografías del autor.

10-13. Límites de consistencia

Los límites de consistencia de la tierra se obtienen a partir de equipos de laboratorio como **la copa de Casagrande, mallas y tamizadoras** como lo requiere la **NMX-C-416-ONNCCE-2003** en sus capítulos **6**¹⁶¹ para el **límite líquido** y el capítulo **7**¹⁶² para el **límite plástico**. Y aunque se presume que estos equipos dotan de un menor rango de error en los resultados, por lo que son los equipos recomendables para dicho procedimiento, el **Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales** de la Facultad de Arquitectura de la UNAM, presenta una **alternativa con fines pedagógicos**¹⁶³, la cual a partir de **materiales comunes** en la construcción como el tubo

¹⁶⁰ American Society for Testing and Materials, “D-4318 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils” (2000).

¹⁶¹ Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., “6. Método de prueba para la determinación de los límites de consistencia” (2003).

¹⁶² Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., “7. Método de prueba para la determinación de la contracción lineal” (2003).

¹⁶³ Cesar Guillén Guillén, Alberto Muciño Vélez, y Gemma Luz Sylvia Verduzco Chirino, “Determinación de los límites líquidos y plásticos de suelos” (Ciudad de México, s/f).

de PVC y un tramo de 50cm de varilla número 3, se puede obtener el límite líquido, mientras que para el límite plástico, el procedimiento seguido es similar al establecido en la norma.

5.1.5 Contracción

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, la **interacción entre la tierra y el agua** juega un papel importante, sin embargo, uno de los efectos que se provocan al mezclar ambos materiales es la **expansión y posterior contracción** de la tierra durante el secado. Esta prueba además de mostrar la contracción que sufre la tierra da un **indicio de lo expansivo de la arcilla** y por tanto **la necesidad de agregar alguna fibra** a fin de contrarrestar estos efectos.

La prueba consta de mezclar la tierra y el agua para obtener una mezcla plástica, para lo cual, se recomienda realizar posterior a la obtención de tal límite. Se usaron **2 moldes, uno prismático de 80cm³ (2x2x20cm) y otro cuadrado de 200cm³ (10x10x2cm)**. Con esto se buscó determinar si la contracción era constante o dependía de la forma y características de la probeta. La contracción es el resultado de la resta de cada medida en seco sobre las medidas iniciales¹⁶⁴.

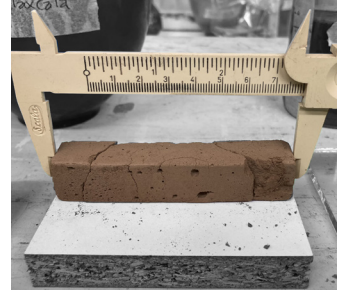


Fig 108 Prueba prismática de contracción. Fotografía del autor.



Fig 109 Prueba cuadrada de contracción. Fotografía del autor.

5.1.6 Cohesión

Entendida como la **capacidad de mantener unidos los granos de la tierra ante una fuerza de tensión**. Por tanto, esta característica dependerá no solo de la cantidad de arcilla, sino de la “calidad adhesiva” de esta.

PL Prueba 8

Existe un procedimiento en el cual, con tierra cribada y mezclada con un poco de agua, se realiza una **pastilla en forma de 8**, (de ahí el nombre), la cual se suspende y se le va **agregando peso de forma gradual** hasta llevar la pieza al quiebre. El cálculo del peso soportado entre el área de la pastilla en la zona más delgada brinda un **dato cuantificable**. El procedimiento para seguir, y las especificaciones del espécimen provienen de la norma alemana **DIN 18952**¹⁶⁵.

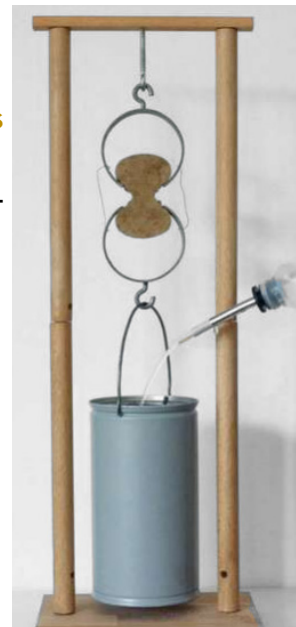


Fig 110 Prueba 8. Tomado de Volhard, 2016.

¹⁶⁴ Cesar Armando Guillén Guillén, Gemma Luz Sylvia Verduzco Chirino, y Alberto Muciño Vélez, “Determinación del límite de contracción lineal de los suelos” (Ciudad de México, s/f).

¹⁶⁵ Franz Volhard, “Soil and earth”, en *Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth*, English (Basel: Birkhäuser, 2016), 41–52.

15.PC Churrometría

Para su equivalente en campo se propone realizar la misma prueba que se enseña en curso de construcción con tierra, la **prueba de cohesividad** o coloquialmente llamada **“churrometría”**.

Para llevarla a cabo se tamiza tierra por una malla fina y se coloca en un tazón. Se va agregando agua hasta lograr una mezcla homogénea y con ella **se amasa a modo de churro**, se puede ir enrollando en una hoja de papel para lograrlo. Posteriormente, se acerca a la orilla de la mesa de trabajo, jalando la hoja, en dirección perpendicular a la superficie de la mesa y se recolectan los pedazos que se van desprendiendo. El **promedio de longitud de los trozos** dará un **indicio de la presencia de arcilla** y su **poder cohesivo**^{166 167}.

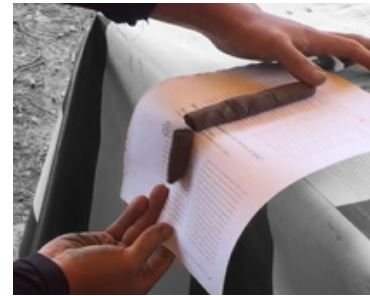


Fig 111 Ejecución de prueba de cohesividad. Fotografía del autor.



Fig 112 Resultados de prueba de cohesividad. Fotografía del autor.

5.2 MEZCLA

Para establecer un diseño de mezcla es importante recordar que, la pajarcilla al considerarse dentro de las técnicas de tierra aligerada, debe estar compuesta de **tierra y algún agregado aligerante**, de cuya mezcla **resulte un material con densidad menor a 1200kg/m³**, esto bajo una definición establecida en el Lehmbauordnung de 1944¹⁶⁸. A partir de esto y las recomendaciones sobre **utilizar mezclas “pesadas”** (que van desde los 800 a los 1100kg/m³) para elementos prefabricados, previamente abordadas en el apartado 2.1.1 de este documento, se definieron **tres mezclas** para elaborar probetas **variando su densidad**, divididas en: **1000 kg/m³**, **900 kg/m³** y **800 kg/m³**.

En el libro de “Construir con tierra aligerada” se presenta una tabla¹⁶⁹ donde se indican las **cantidades aproximadas para lograr dichas densidades**. Como la densidad implica solo la tierra y la paja, la tabla únicamente muestra las cantidades para estos dos componentes. Para saber la **cantidad de agua** a usar se consideró como **base el límite líquido**, a partir del cual se fue aumentando la cantidad de agua en razón de 5%, **hasta lograr la consistencia de la barbotina** (ver capítulo 3.1.1 La barbotina).

Para **corroborar las cantidades** indicadas se realizó un muestreo de diseño de mezcla. Se fabricó una **muestra cúbica (10x10x10cm) por cada densidad** buscada. En primera instancia, se mezcló el agua junto con la tierra para obtener la

166 Carazas Aedo y Cooperación Comunitaria, “Materia prima”.

167 Caballero Cervantes y Guerrero Baca, “Curso de Inmersión en la Bioconstrucción”.

168 Franz Volhard, “Building with earth-a historical overview”, en Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth, English (Basel: Birkhäuser, 2016), 33–40.

169 Volhard, “Preparation of the light earth mix”.

barbotina, dejándola reposar 24 horas. Para esto se **utilizó la tierra** proveniente de **Tlaxco, Tlaxcala** por ser la tierra utilizada en el Proyecto San Isidro para realizar el entrepiso de pajarcilla tradicional, por lo que la **puesta en práctica ha comprobado su utilidad en esta técnica**, además de que la caracterización realizada corroboró la cualidad arcillosa de esta tierra, por encima de las otras 2 analizadas.



Fig 113 Elaboración de mezcla por densidad. Fotografía del autor.



Fig 114 Preparación de los componentes. Fotografía del autor.



Fig 115 Resultado de probetas por densidad. Fotografía del autor.



Fig 116 Compresión de las probetas en prensa hidráulica. Fotografía del autor.

Una vez pasado el tiempo establecido, se esparció una primera capa de paja a la cual se le vertió barbotina y se continuó con capas subsecuentes de paja y barbotina, hasta vaciar los volúmenes calculados. El **mezclado se realizó de forma manual** hasta que visualmente, la fibra perdiera su color amarillento por la cobertura de la barbotina. Se **compactó la mezcla al interior del molde con una prensa, aplicando 150kgf de presión** y se desmoldó de inmediato. Las probetas se pesaron cada 2 días hasta que la masa fuera estable (cambios en el peso menores al 1%), ya que, por la capacidad higrotérmica de la tierra, el contenido de humedad nunca será constante.

Cantidades para 1 m ³							
Densidad kg/m ³	Tierra	Paja	Agua	Factor extra	Cantidades totales		
	kg	kg	kg		Tierra	Paja	Agua
800	720,00	80,00	360,00	20%	864,00	96,00	432,00
900	820,00		410,00	10%	902,00	88,00	451,00
1000	920,00		460,00	5%	966,00	84,00	483,00

Tab 4 Cantidades por m³ para cada densidad. Elaboración propia a partir de experimentación y Volhard, 2016.

Con este primer muestreo y la referencia bibliográfica se obtuvieron las densidades buscadas, sin embargo, al realizar las probetas, se tuvo que aplicar un **factor de ajuste** para cada densidad, ya que conforme la densidad aumenta, se requiere menor cantidad de mezcla por la proporción de tierra.

Actividades	Equipos/Herramientas/ Instrumentos de medición	Escala	Alcance	Resolución	Incertidumbre
Practica de diseño de mezcla por densidad					
Elaboración de muestras	Báscula digital	Digital	2-3000 g	0.1 gramo	0.1 gramo
	Prensa hidráulica	Digital	ver prensa	ver prensa	ver prensa
Pesaje y cálculo de densidad	Báscula digital	Digital	2-3000 g	0.1 gramo	0.1 gramo
	Regla/vernier	Analógica	0.05-120mm	0.05mm	0.05mm

Tab 5 Equipos, herramientas e instrumentos de medición utilizados en el diseño de mezcla. Elaboración propia.

5.2.1 Variables por tipo de estabilización

Los materiales participantes para las evaluaciones mecánicas por tipo de estabilización son: **tierra, paja de trigo, agua, mucílago de nopal y pasta de cal**. Como variables adicionales de análisis se consideró el **proceso de compactación** de las piezas, y la **densidad**.

Física y Mecánica

Con las **densidades** establecidas (**800, 900 y 1000 kg/m³**) se realizaron probetas para evaluar el proceso de elaboración por **compresión manual** y otra por **medios mecánicos**. Ambas variables fueron extraídas de la literatura y el muestreo previo. La compactación mecánica se realizó con ayuda de una **prensa hidráulica aplicando 150 kgf** en un área de 100 cm², correspondiente a la cara superior de las probetas. La compactación manual no tuvo un control de presión ya que se consideró que mientras se compactara el volumen calculado de mezcla dentro de los 500m³ de la probeta, se lograría la densidad buscada.

A **flexión** se realizaron **seis series con 3 probetas** por cada una para un **total de 18 probetas** para el ensayo. A **compresión** fueron **3 series con 3 probetas** cada una, ya que en este caso no se evaluó el método de compactación. Los resultados de esta evaluación definen la densidad y el proceso de elaboración-compactación para las siguientes etapas.

Por armazón

En esta serie, la **variable de análisis es la longitud de la fibra**. Para este caso se recomienda que la longitud de la fibra debe ser igual o menor que la longitud más corta de la pieza¹⁷⁰. Como la zona donde se aplicará la carga a la pieza modular es de 70x15x10cm se tomaron esos **15 cm como la longitud mayor** de fibra a evaluar, mientras que, para la **longitud menor se tomaron los 5cm** de las probetas, al ser de 20x5x5 cm. Con estas consideraciones se realizaron **12 probetas divididas en 4 series**, por longitud de fibra, quedando de la siguiente forma: (1) fibras **menores a 5cm**, (2) fibras **entre 5 y 10cm**, (3) fibras menores a 10 cm, (4) fibras **entre 10 y 15cm** y los resultados de la etapa anterior donde se utilizaron fibras **menores a 15cm**. La fibra utilizada fue paja de trigo de pacas usadas para forraje.

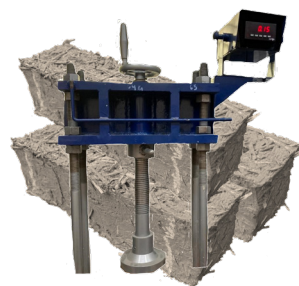


Fig 117 Estabilización mecánica a flexión. Elaboración propia.



Fig 118 Estabilización física a flexión, compresión y pieza prefabricada. Elaboración propia.



Fig 119 Estabilización por armazón a flexión. Elaboración propia.

170 Volhard, "Self-produced bricks and panels".

Con estos resultados se estableció la longitud de fibra a utilizar para las probetas de las siguientes etapas. Esta variable **no fue evaluada a compresión**, debido a 2 razones: las medidas de la probeta no permitían hacer mezclas con fibras largas al ser de 5x5x5 cm y porque se propone verter y compactar in situ la capa de compresión, por lo que se requiere un tamaño de fibra menor para la fluencia de la mezcla. **Las constantes** en todas las probetas fueron: **la densidad y el proceso de elaboración-compactación**.

Química

Una vez definidas las primeras tres variables (densidad, proceso de elaboración-compactación y longitud de fibra) se procedió a determinar el efecto de 2 agregados para **estabilización química**: el mucílago de nopal y la cal en pasta. Para ambas pruebas, **compresión y flexión**, se realizaron **12 probetas divididas en 4 series**: (1) Sin estabilizante, (2) **15% de mucílago de nopal**, (3) **20% de cal en pasta** y (4) 15% de mucílago más 20% cal en pasta.

El **mucílago de nopal** se obtuvo de pencas mediante extracción en seco. El porcentaje peso-peso con el agua de la mezcla se determinó a partir de mezclar mucílago y agua hasta **lograr un hilo de 50cm** al “pellizcarla” y separar la mano del traste contenedor. Para determinar la cantidad de **pasta de cal** a utilizar en la mezcla se **monitoreó el pH** de acuerdo con lo establecido en el apéndice X1 de la norma **ASTM C-977 02**¹⁷¹.

Homogénea

Después de obtener una mezcla con base en los resultados de cada serie, se optó por **evaluar la influencia** del componente con mayor presencia en la mezcla: **la tierra**. Para lo cual se replicó el procedimiento de caracterización en las **otras 2 tierras**. Las tierras evaluadas se identificaron como tierra **limosa (M)** y tierra **arenosa (S)**. Aunque las tierras arenosas, tienen mayor parte gruesa que fina, la tierra con la que se estaba trabajando se podría clasificar como **“arenosa-arcillosa” (SC)** por lo que se optó por disgregar y cribar esta tierra para separar la parte fina.

Se realizaron **16 probetas para ser evaluadas a flexión**: 5 de tierra arcillosa, 5 de tierra limosa, 3 de tierra arenosa y 3 de tierra arenosa cribada. Para evaluar la **com-**

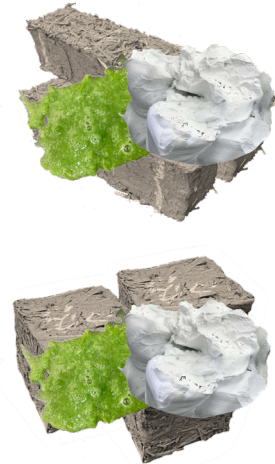


Fig 120 Estabilización química a flexión y compresión. Elaboración propia.



Fig 121 Estabilización homogénea a flexión, compresión y piezas prefabricadas. Elaboración propia.

171 ASTM International, “Eades and grim test method for determining the approximate lime/soil proportion for stabilization”, Pub. L. No. ASTM C 977-02 (s/f).

presión, la serie **se redujo a 10**: 5 probetas de tierra limosa y 5 probetas de tierra arenosa cribada. Para comparar con la tierra arcillosa, se tomaron los resultados de las series anteriores. En todos los casos se mantuvieron **constantes: la densidad, la compactación y la longitud de fibra**.

5.2.2 Evaluación a flexión

La resistencia que puede llegar a presentar la tierra a flexión puede ser despreciable, sin embargo, en la pajarcilla, **la fibra absorbe parcialmente este esfuerzo**, mientras que **la tierra lo hace a compresión**, generando una mezcla óptima para entrepisos o cubiertas.

Las evaluaciones de la mezcla a flexión se realizaron en la **máquina de ensayos universales** del Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales (LMSE) de la UNAM tomando como referencia la norma **NMX-C-303-ONNCCE**¹⁷². Aunque la norma indica que la aplicación de la carga debe ser 10 kgf/cm² por min, por estar enfocada a evaluar un material más resistente pero frágil, como el concreto, se decidió verificar otros trabajos^{173 174} donde se hayan evaluado mezclas de tierra a flexión. Se encontró que **la prueba se realizaba en razón del desplazamiento y no de la carga** (0.5mm/min o 1mm/min).



Fig 122 Cantidad mínima de probetas por evaluación, molde fabricado para las probetas a flexión y diagrama de prueba. Elaboración propia.

Además de esto, como la **estructura principal** del entrepiso es de **madera**, se encontró que, en las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones, existe el término de pisos ligeros de madera¹⁷⁵. Para que la propuesta de entrepiso entrara en este criterio se necesitaba **comprobar que la pajarcilla proporcionaba una rigidez y flexibilidad similar a la madera**. Con todos los criterios mencionados, se optó por aplicar por desplazamien-

172 s.c. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, "Industria de la construcción - concreto - Determinación de la resistencia a la flexión usando una viga simple con carga en el centro del claro", Pub. L. No. NMX-C-303-2004, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, s.c. (2004).

173 G. Araya-Letelier et al., "Influence of natural fiber dosage and length on adobe mixes damage-mechanical behavior", *Construction and Building Materials* 174 (el 20 de junio de 2018): 645–55, <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.04.151>.

174 Shantanu Paul, Mohammad Shariful Islam, y Mohammad Iqbal Hossain, "Suitability of Vetiver straw fibers in improving the engineering characteristics of compressed earth blocks", *Construction and Building Materials* 409 (el 15 de diciembre de 2023): 134224, <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.134224>.

175 Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda y Secretaría de Obras y Servicios, Normas Técnicas Complementarias Sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones.

to a fin de lograr una **aplicación constante** de la misma, tal como lo solicitan tanto la **ASTM D-143**¹⁷⁶ como la **NMX-C-446-ONNCCE-2006**¹⁷⁷ que evalúan elementos de madera.

Para las medidas de las probetas se respetaron las especificaciones de la norma, que pide **un claro de 3 veces el peralte**, así como un extra a los extremos de al menos 1". Para cada muestreo se requiere un **mínimo de 3 probetas de 20x5x5cm**, siendo preferible para el análisis estadístico realizar 5 probetas. Las pruebas a flexión se utilizaron para **establecer la mezcla** a utilizar en las **piezas prefabricadas o elementos modulares**. Los equipos utilizados para estas etapas se enlistan en la siguiente tabla.

Actividades	Equipos/Herramientas/ Instrumentos de medición	Escala	Alcance	Resolución	Incertidumbre
Evaluación a flexión					
Elaboración de probetas	Báscula digital	Digital	2-3000 g	0.1 gramo	0.1 gramo
	Jarra medidora	Análogica	250ml	0.10ml	25.00ml
	Medidor de Ph	Digital	0.1-14	0.01	-
	Flexómetro	Análogica	0.01-3m	1mm	0.5mm
Pesaje y medición	Báscula digital	Digital	2-3000 g	0.1 gramo	0.1 gramo
	Regla/vernier	Análogica	0.05-120mm	0.05mm	0.05mm
Evaluación de las probetas	Máquina de ensayos universales	Digital	+/-0.02%	+/-0.02%	+/-0.02%

Tab 6 Equipos, herramientas e instrumentos de medición utilizados en pruebas a flexión. Elaboración propia.

5.2.3 Evaluación a compresión



Fig 123 Cantidad mínima de probetas por evaluación, molde fabricado para las probetas a compresión y diagrama de prueba. Elaboración propia.

La **evaluación de la mezcla a compresión** se llevó a cabo tomando como referencia la especificaciones y métodos de ensayo establecidos en la normativa **NMX-C-508-ONNCCE**¹⁷⁸ que evalúa a compresión Bloques de tierra comprimida estabilizados con cal, que a su vez se refiere a la **NMX-C-036-ONNCCE**¹⁷⁹. Para este caso, las probetas deben ser **cúbicas de 5x5cm**. Nuevamente se mantuvo la cantidad de probetas mínimas (3), como en el caso de la prueba a flexión, se modificó unificó la **aplicación de la carga en razón del desplazamiento** de 5 mm por minuto,

176 American Society for Testing and Materials, "D-143 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber", Pub. L. No. D-143 (2000), <https://x.com/comunal taller/status/1295404402359009281>.

177 Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., "Industria de la construcción - Vivienda de madera y equipamiento urbano - Métodos de ensayo para determinar las propiedades mecánicas de la madera de tamaño estructural", Pub. L. No. NMX-C-446-ONNCCE-2006 (2006).

178 Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., "Industria de la construcción - Bloques de tierra comprimida estabilizados con cal - Especificaciones y métodos de ensayo", Pub. L. No. NMX-C-508-2015 (2014).

179 Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., "Industria de la construcción - Mampostería - Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines - Método de ensayo", Pub. L. No. NMX-C-036-ONNCCE-2013 (2013).

realizadas todas las pruebas en la máquina de ensayos universales del LMSE. Este punto evalúa la **mezcla que se utilizará para la capa de compresión**. La incertidumbre y exactitud de los equipos utilizados para estas evaluaciones se presentan en la tabla a continuación.

Actividades	Equipos/Herramientas/ Instrumentos de medición	Escala	Alcance	Resolución	Incertidumbre
Evaluación a compresión					
Elaboración de probetas	Báscula digital	Digital	2-3000 g	0.1 gramo	0.1 gramo
	Medidor de Ph	Digital	0.1-14	0.01	-
	Jarra medidora	Análogica	250ml	0.10ml	25.00ml
Pesaje y medición	Báscula digital	Digital	2-3000 g	0.1 gramo	0.1 gramo
	Regla/vernier	Análogica	0.05-120mm	0.05mm	0.05mm
Evaluación de las probetas	Máquina de ensayos universales	Digital	+/-0.02%	+/-0.02%	+/-0.02%

Tab 7 Equipos, herramientas e instrumentos de medición utilizados en pruebas a compresión. Elaboración propia.

5.3 PIEZA PREFABRICADA

5.3.1 Diseño de pieza y molde

Al proponer piezas prefabricadas 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 jugaron un papel importante en el diseño.

Como la pajarcilla está dentro de los sistemas de entramados, esto quiere decir que **requieren refuerzos adicionales en entrepisos y cubiertas**¹⁸⁰, en el entrepisos de pajarcilla tradicional, estos refuerzos se colocan **a cada 15cm** de forma perpendicular y sobre un riel de madera clavado en la viga, ahogados en la mezcla de pajarcilla, con un **grosor de entrepiso de 8-15cm**¹⁸¹. Estos criterios se usaron para las características y medidas de las piezas modulares.

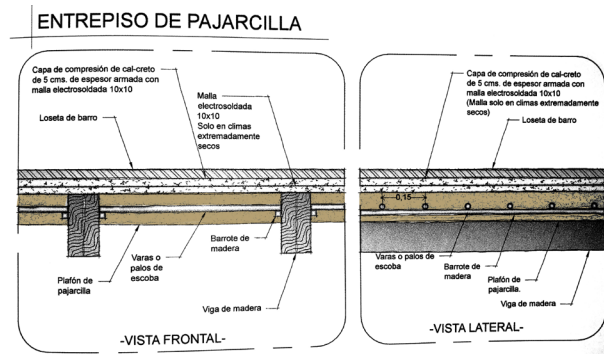


Fig 124 Diagrama de entrepiso de pajarcilla tradicional. Tomado de Caballero Cervantes y Guerrero Baca, 2021. Edición propia.

Para **reducir el riesgo de fallo por cortante**, se buscó que las piezas modulares y el refuerzo interior se recargaran directamente en la parte superior de la viga. Por lo cual, 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. Además, se encontró que, aunque la **sección de las vigas** utilizadas en el entrepiso de pajarcilla 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, se planteó que

¹⁸⁰ Caballero Cervantes y Guerrero Baca, "Entramados".

¹⁸¹ Caballero Cervantes, "Notas sobre bioconstrucción".

el diseño de la pieza permita **adaptar las medidas de la pestaña de apoyo a las medidas de las vigas** de acuerdo con cada proyecto (ver **Anexo 2: Hoja de producto**).

Por ser una nueva propuesta, también se diseñó y construyó el molde de madera para poder fabricar las piezas a evaluar. Si bien, el molde se modificará en función de las características de las piezas, producto de las medidas y requerimientos de cada proyecto, **la cantidad de madera usada en 2 moldes es inferior a la utilizada en la cimbra del método tradicional** (ver **Anexo 3: Cantidades de material y rendimientos**).

5.3.2 Evaluación de pieza prefabricada

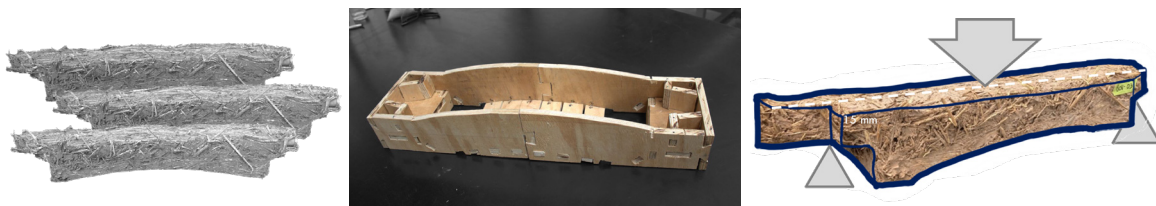


Fig 125 Cantidad mínima de piezas por evaluación, molde fabricado para las propuesta de piezas y diagrama de prueba.
Elaboración propia.

Con las pruebas a la pajarcilla (a flexión y compresión) el objetivo fue **determinar la resistencia del material**, bajo el supuesto que, entre mayor resistencia presentara, mayor probabilidad existe de que al utilizar ese material en el elemento modular, se cumpla lo establecido en la norma. 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-ONNCCE**¹⁸². Para este caso, el tener elementos modulares permite su **evaluación a escala 1:1** y de forma similar a la que estarán sometidos en su colocación final.

El diseño por forma y el trabajo de esta técnica en conjunto con la estructura de madera fue clave para la propuesta, por lo que, para la evaluación de las piezas prefabricadas, se **adaptó un soporte que equivalió a las vigas del entrepiso**, el cual se debe unir 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 éstas**, anulando de algún modo, el riesgo de volteo o separación.

Aunque la NMX-C-463-ONNCCE 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

¹⁸² Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., “Industria de la construcción – Bovedilla de poliestireno expandido para losas de entrepisos y azotea de concreto a base de viguetas prefabricadas - Especificaciones y métodos de ensayo”, Pub. L. No. NMX-C-463-2009 (2009).

carga usado en las probetas, con un **desplazamiento de 5mm/min**, hasta llegar a aplicar la carga solicitada por la norma. 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 **24 pruebas**, todas en la máquina de ensayos universales del LMSE.

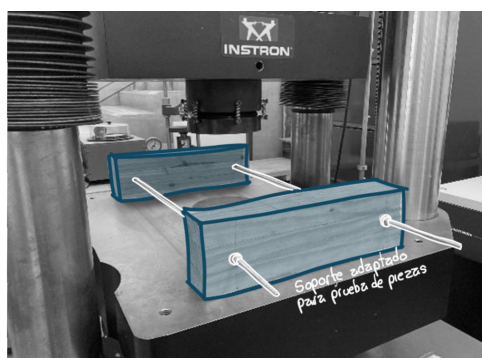


Fig 126 Soporte para evaluación de piezas prefabricadas. Elaboración propia.

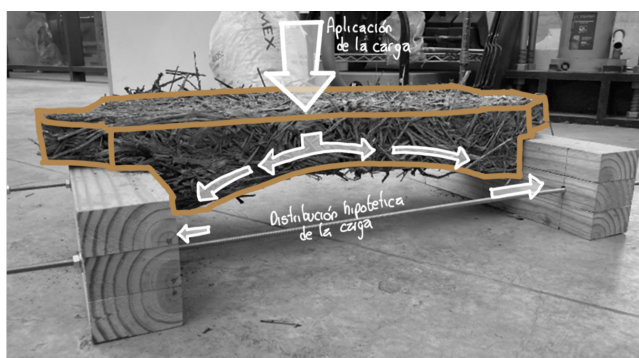


Fig 127 Diagrama de fundamento teórico de la repartición de carga por la forma curva al inferior. Elaboración propia.

5.3.3 Evaluación del refuerzo interior

Tras cuestionar si realmente lo que está resistiendo la carga en la pieza prefabricada era la pajarcilla o el refuerzo de madera, **se probaron a flexión los refuerzos interiores aislados**. La aplicación de la carga se realizó **a 5mm/min** sobre 3 refuerzos redondos de madera. La longitud de estos fue la misma que se ocupa para evaluar la pieza prefabricada (60cm).

5.4 SISTEMA

5.4.1 NTC Normativa

Así como cuando se evalúa un adobe, su resistencia como pieza no es escalable de la resistencia de un muro completo, se hace **necesario estudiar y evaluar el entrepiso en su totalidad**. Sin embargo, no existe un método específico para evaluar experimentalmente un entrepiso, ya que la norma NMX-C-406-ONNCCE¹⁸³ sobre métodos de evaluación para los componentes de sistemas de losas de concreto prefabricadas, **evalúa los elementos por separado**, las normas técnicas complementarias 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 produzcan las condiciones reales**.

¹⁸³ Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., "Industria de la construcción - Componentes para sistemas de losas prefabricadas de concreto - Especificaciones y métodos de ensayo", Pub. L. No. NMX-C-406-ONNCCE-2019 (2019).

Esto puede realizarse usando algún **software de simulación alimentado de los datos obtenidos en las propias pruebas** o en su defecto, realizar **pruebas empíricas o de campo**, como las observadas en los casos análogos que, aunque no se tiene una carga constante ni un registro riguroso, si al **fabricar un módulo de 1 m² escala 1:1 e ir sumando los pesos de las personas** que se van subiendo al módulo se da una **carga mayor a la combinación marcada en las NTC**, se estaría cumpliendo con ello. Además de ser el método más sencillo de replicar, es el más representativo visualmente y que la aplicación de la carga es similar a la que estará sometido en la vida útil del sistema.

Cualquiera de los dos métodos, **requiere el cálculo previo de la combinación de cargas** de acuerdo con el apartado de pisos ligeros de madera de las NTC, donde se establece que se debe tomar la **carga viva** como una carga concentrada de **250 kgf** para los **elementos de soporte y de 1 kN (100 kgf)** para el **diseño de la cubierta** ¹⁸⁴.

Para la combinación de cargas a utilizar se diferencian: la **carga viva máxima** (W_m), la **carga instantánea** (W_a) y la **carga media** con (W). Mismas que se consideran distribuidas sobre el área tributaria de cada elemento. Para verificar la seguridad de la estructura, esta se debe verificar bajo el **efecto de la combinación de cargas de todas las acciones que tengan probabilidad de ocurrir simultáneamente**. Las normas Técnicas Complementarias consideran 2:

1. Acciones **permanentes** y acciones **variables**, tomando la **más desfavorable** con su **intensidad máxima** y el **resto con intensidad instantánea**. O cuando se trate de evaluar efectos a largo plazo, todas se deberán tomar con su intensidad media. La intensidad máxima de la carga viva se considerará como uniformemente repartida sobre toda el área.
2. Acciones **permanentes, variables y accidentales**, tomando tanto permanentes como variables con sus **valores instantáneos** y únicamente **una accidental** por combinación.

En todas las combinaciones deberán **aplicarse los factores de carga** especificados en el punto 3.4¹⁸⁵ donde menciona:

- a) Para la **primera combinación** de acciones se aplicará un factor de carga de **1.3 para cargas permanentes** y de **1.5 para cargas variables** mientras que
- b) Para la **segunda combinación** se aplicará el factor de carga de **1.1 a todas** las acciones.

¹⁸⁴ Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda y Secretaría de Obras y Servicios, Normas Técnicas Complementarias Sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones.

¹⁸⁵ Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda y Secretaría de Obras y Servicios.

ENTREPISO SEMI-PREFABRICADO DE PAJARCILLA

Entrepiso semi-prefabricado de tierra aligerada			
C.MUERTAS			
Modulo	Largo	Ancho	Area
	1.00	1.30	1.30
	Peso (kg/m3)	Grosor (m)	Total (kg/m2)
Loseta de barro rojo recocido 30x30x2	1500.00	0.02	30.00
		1x1x0,02	1500x0,02
Mortero cal-arena 1:3	1500.00	0.02	30.00
		1x1x0,02	1500x0,02
Capa de compresión de tierra aligerada	1000.00	0.05	50.00
		1x1x0,05	980x0,05
Elementos prefabricados compactados de tierra aligerada	V. bruto	V. vacío	V. neto
	0.13	0.0311	0.0989
	area x 0,10	(a.rectangulo + s.agita) x 2	v.bruto - v.vacío
	Peso (kg/m3)	V. neto	Peso módulo
	980.00	0.10	96.93
			980x0,010
	Peso por m2		74.56
	Peso módulo/area modulo		
Vigas de madera laminada 0.15 x 0.20	V. bruto	V. vacío	V. neto
	0.26	0.2000	0.0600
	area x 0,10	a.rectangulo	v.bruto - v.vacío
	Peso (kg/m3)	V. neto	Peso módulo
	500.00	0.06	30.00
			500x0,02
	Peso por m2		23.08
	Peso módulo/area modulo		
	CM TOTAL		207.64

C. VIVAS				
		W	Wa	Wm
Casa Hab.		80	100	190.00
Pisos ligeros (soporte)			250.00	
Pisos ligeros (cubierta)			100.00	
			A usar	250.00
C.SERVICIO				
=Carga Muerta+Carga Viva				
		457.64	kg/m2	
Factores de carga				
Permanentes		1.3	207.64	269.93
Variables		1.5	250.00	375.00
			Carga total	644.93

Tab 8 Cálculo de carga a resistir como piso ligero de madera de acuerdo con la combinación 1 de las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones.
Elaboración propia.

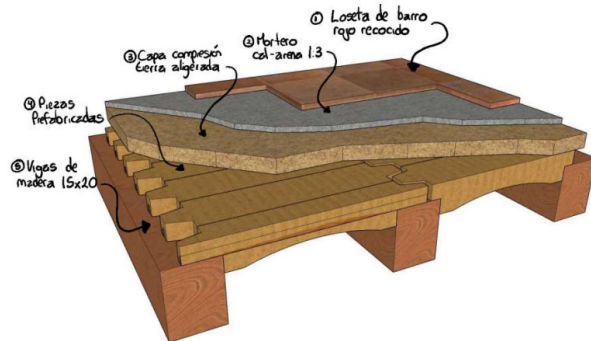


Fig 128 Diagrama de entrepiso semi-prefabricado de pajarcilla.
Elaboración propia.



6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 CARACTERIZACIÓN DE LA TIERRA

En total se **analizaron 3 tierras** provenientes de: 1) **Tlaxco, Tlaxcala**, 2) **Tlayacapan, Morelos** y 3) **Atltzayanca, Tlaxcala**. La primera tierra es la misma que se utiliza en el Proyecto San Isidro para el entrepiso de pajarcilla tradicional. En el Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales (LMSE) de la UNAM contaban con la tierra de Tlayacapan Morelos, por lo que se decidió analizarla y caracterizarla. Por último, se consiguió tierra de Atltzayanca, ya que se buscaba tener una tierra completamente distinta a las otras 2. Por la técnica constructiva con la que se construye en la zona (tapial), se intuyó que esta podría tender hacia lo arenoso.

6.1.1 Preparación

Aunque **todas las muestras** caben en la clasificación de “**muestras alteradas**” del capítulo 2 de la NMX-C-416-ONNCCE ¹⁸⁶, cada una corresponde a un tipo distinto. Como la **tierra de Tlayacapan** ya se encontraba en el LMSE, se consultó con los encargados del laboratorio la forma de extracción y transporte. Se encontró que la tierra fue **utilizada para una investigación previa** y que había sido **obtenida de una excavación menor a 1m de profundidad**, por lo tanto, se entiende como **superficial**.

La **tierra de Tlaxco** fue donada por el Proyecto San Isidro para el entrepiso de pajarcilla. Esta tierra es **extraída de un banco cercano**, dentro del mismo municipio, donde se fabrican adobes y tabique rojo recocido, por lo que, es una **muestra lateral o frontal**. Para su análisis fue transportada en 4 botes de 20 litros desde la zona de almacenamiento hasta el LMSE de la Facultad de Arquitectura de la UNAM.

Un tratamiento similar se llevó a cabo para el transporte de la **tierra de Atltzayanca**. En este caso la tierra fue donada por el dueño del terreno, la cual era producto de una **excavación realizada con anterioridad**, así que esta **muestra es profunda**, ya que la excavación llegaba hasta los 1.70m.

En cuanto a la **preparación** de las muestras para su análisis **en laboratorio**, el capítulo tercero de la normativa ¹⁸⁷ solicita secar las muestras al sol o bien, en un horno. Como se buscaba la forma en que se **replicaría en la práctica constructiva**, el secado se realizó dejando las muestras descubiertas, lo cual no requirió más de 1 día, ya que las 3 tierras se encontraban parcialmente secas. Para la **disgregación**, se ocupó **un marro tipo maceta para golpear la tierra** dispuesta en una charola metálica y se repitió el procedimiento hasta que la tierra pasara por la **mallita no.2**. El material que no pasaba por esta mallita se apartó. El **cuarteo** se realizó de forma

¹⁸⁶ Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., 2. Procedimiento de muestreo e identificación de muestras en campo.

¹⁸⁷ Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., 3. Procedimiento para la preparación de las muestras de laboratorio.

manual, desde el llenado de las cubetas para su transporte. Para el caso de la tierra de Tlayacapan, esto se realizó en una tina dentro del LMSE.

6.1.2 Clasificación preliminar

2-5. Pruebas de campo para caracterizar tierra

Con la **tierra de Tlaxco** se **logró realizar el cordón** de 3mm de diámetro **en 2 ocasiones** en los primeros 2 muestreos, **en el 3 muestreo se logró 3 veces**. Aunque la diferencia no resulta significativa, se pudo deber a la cantidad de agua o el tiempo de amasado, que entre mayor sea, dota de una mayor plasticidad a la mezcla. **Su consistencia en seco tuvo mayor variación**, ya que dependía de la zona donde se tomaba la muestra además que, tras el cribado previo aún se cuenta con diversidad de granos, por lo que la presión podía ejercerse en arenas o terrones de arcilla. **La velocidad de pérdida de brillo** en la prueba de sacudimiento fue, en los 3 casos, **demasiado lenta**, casi imperceptible. Por último, en el método del rollo, al ser similar a la prueba del cordón, se obtuvieron resultados similares, lo que respalda ambos procedimientos. Tras el vaciado de la información en la tabla 8, se clasifica esta muestra como CL, arcillosa de baja plasticidad.

Clasificación: Pruebas de campo				
Tierra de:		Tlaxco, Tlaxcala		
Plasticidad (bola-cordón)	Consistencia en seco	Reacción ensayo de sacudimiento	Límite Plástico (método del rollo)	Grupo de suelos SUCS
0	0	muy rápida	ninguna	SP
0	0-1	rápida	muy baja	SM
1	0-1	rápida	baja	SC
0	1-2	rápida-lenta	media	ML
2	2-4	ninguna-m lenta	media	CL
1	1-3	lenta	ligera	OL
1	1-3	lenta-ninguna	ligera-media	MH
3	3-5	ninguna	alta	CH
2-3	2-4	ninguna-m lenta	liger-media	OH

Tab 9 Resumen de resultados de pruebas de campo. El tono corresponde a las veces en que se repitió el resultados en los 3 muestreos. Elaboración propia.



Fig 129 Prueba de corte de esfera donde se observa lo arcilloso de la tierra por la adherencia a la mano. Fotografía del autor.

La **tierra de Tlayacapan** presentó una **plasticidad ligeramente mayor**, logrando 3 veces el cordón de 3mm en 2 muestreos y solo 2 ocasiones en el tercer muestreo. Su **consistencia en seco tuvo** una menor variación, lo que habla de una

Caracterización: Pruebas de campo				
Tierra de:		Tlayacapan, Morelos		
Plasticidad (bola-cordón)	Consistencia en seco	Reacción ensayo de sacudimiento	Límite Plástico (método del rollo)	Grupo de suelos SUCS
0	0	muy rápida	ninguna	SP
0	0-1	rápida	muy baja	SM
1	0-1	rápida	baja	SC
0	1-2	rápida-lenta	media	ML
2	2-4	ninguna-m lenta	media	CL
1	1-3	lenta	ligera	OL
1	1-3	lenta-ninguna	ligera-media	MH
3	3-5	ninguna	alta	CH
2-3	2-4	ninguna-m lenta	liger-media	OH

Tab 10 Resumen de resultados de pruebas de campo. En este caso, ninguna prueba coincidió en sus 3 resultados. Elaboración propia.



Fig 130 Prueba de corte de esfera donde la tierra no se queda pegada a la mano ni al hacer el corte. Fotografía del autor.

menor distribución granulométrica. La **pérdida de brillo** se dio de manera **rápida** al inicio y se fue alentando conforme avanzaba el tiempo. Nuevamente, la prueba del rollo tuvo relación con la prueba del cordón. Tras la ejecución de estas pruebas, se entiende que se **cuenta con una tierra MH o bien, limosa de alta plasticidad.**

Para el caso de la **tierra de Atltzayanca no se logró hacer el cordón** de la primera prueba, salvo en una ocasión, pero sin llegar a los 10cm. Su consistencia en **seco presentó una resistencia alta** ante el aplastamiento de la mano, salvo una ocasión donde se disgregó fácilmente. La **pérdida de brillo fue rápida** en el primer muestreo **y casi imperceptible** en los otros 2 casos. En la última prueba sí se logró comenzar a hacer los rollos, sin embargo, estos se disgregaban a los 5-7cm. Por las características que presenta esta tierra, con cierto grado de cohesión junto con un indicio de gran cantidad de arenas, **se cataloga como SC** o arena arcillosa.

Caracterización: Pruebas de campo				
Tierra de:		Atltzayanca, Tlaxcala		
Plasticidad (bola-cordón)	Consistencia en seco	Reacción ensayo de sacudimiento	Límite Plástico (método del rollo)	Grupo de suelos SUCS
0	0	muy rápida	ninguna	SP
0	0-1	rápida	muy baja	SM
1	0-1	rápida	baja	SC
0	1-2	rápida-lenta	media	ML
2	2-4	ninguna-m lenta	media	CL
1	1-3	lenta	ligera	OL
1	1-3	lenta-ninguna	ligera-media	MH
3	3-5	ninguna	alta	CH
2-3	2-4	ninguna-m lenta	liger-media	OH

Tab 11 Resumen de resultados de pruebas de campo. La variación de los resultados fue mayor para esta tierra. Elaboración propia.



Fig 131 Prueba de corte de esfera. Aunque se ve una tierra arenosa, esta se queda pegada a la mano. Fotografía del autor.

6.1.3 Composición

6,7. Tamizado

Debido a que las mallas de laboratorio llegan hasta la **número 200** y que por el tamaño de su abertura se estarían **mezclando los limos y las arcillas**, se entiende que la prueba de **tamizado** sirve únicamente para **determinar si el tipo de tierra** analizado entra en la categoría de **gruesos o finos**.

Aunque la norma¹⁸⁸, propone usar 14 mallas distintas, en este caso se decidió **omitir las primeras 7**, ya que, al haber cribado previamente la tierra por la malla 4 en la preparación de la muestra, no se retenía material alguno en las mallas previas a esta última. Además, se **omitieron las mallas 20, 60 y 100**, esto porque con las restantes se **cumplía con las medidas de las arenas, encontradas en la literatura**¹⁸⁹ y abordadas en el capítulo 4.2 de este documento. Para el **cribado de campo** se utilizaron las **mismas mallas**, con la diferencia de que el **movimiento se realizó de forma manual**, siguiendo lo indicado en la normativa.

¹⁸⁸ Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., 5. Método de prueba para determinar el análisis granulométrico.

¹⁸⁹ Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, "11. Clasificación de los suelos", consultado el 21 de julio de 2024, https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s11.htm#83a.

Evaluación de Composición: Tamizado en Laboratorio					
Tierra de:		Muestreo	Cantidad de material		
Tlaxco, Tlaxcala		Promedio	500 gramos		
Malla	M1	M2	M3	Porcentaje retenido promedio	Clasificación
	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido		
#	%	%	%	%	
4	2.44	5.06	6.10	4.53	Gravas
10	14.36	10.58	16.10	13.68	A. gruesas
40	29.74	28.96	26.32	28.34	A. medianas
200	38.22	38.44	37.06	37.91	A. finas
base	14.90	16.6	14.24	15.25	Limos/arcillas
	99.66	99.64	99.82	99.71	

Tab 12 Resumen de tamizado en laboratorio para la tierra de Tlaxco, Tlaxcala. Elaboración propia.

Evaluación de Composición: Tamizado en Campo					
Tierra de:		Muestreo	Cantidad de material		
Tlaxco, Tlaxcala		Promedio	500 gramos		
Malla	M1	M2	M3	Porcentaje retenido promedio	Clasificación
	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido		
#	%	%	%	%	
4	1.82	0.00	0.44	0.75	Gravas
10	8.22	2.76	8.82	6.60	A. gruesas
40	24.38	28.56	27.60	26.85	A. medianas
200	50.12	45.00	46.80	47.31	A. finas
base	15.16	23.32	15.72	18.07	Limos/arcillas
	99.70	99.64	99.38	99.57	

Tab 13 Resumen de tamizado en campo de la tierra de Tlaxco, Tlaxcala. Elaboración propia.

Evaluación de Composición: Tamizado en Laboratorio					
Tierra de:		Muestreo	Cantidad de material		
Tlayacapan, Morelos		Promedio	500 gramos		
Malla	M1	M2	M3	Porcentaje retenido promedio	Clasificación
	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido		
#	%	%	%	%	
4	14.30	12.22	12.44	12.99	Gravas
10	23.10	22.20	23.28	22.86	A. gruesas
40	29.06	31.76	30.50	30.44	A. medianas
200	26.76	22.96	21.32	23.68	A. finas
base	6.74	10.30	12.26	9.77	Limos/arcillas
	99.96	99.44	99.80	99.73	

Tab 14 Resumen de tamizado en laboratorio de la tierra de Tlayacapan, Morelos. Elaboración propia.

Evaluación de Composición: Tamizado en Campo					
Tierra de:		Muestreo	Cantidad de material		
Tlayacapan, Morelos		Promedio	500 gramos		
Malla	M1	M2	M3	Porcentaje retenido promedio	Clasificación
	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido		
#	%	%	%	%	
4	7.92	8.04	0.24	5.40	Gravas
10	19.22	20.90	18.28	19.47	A. gruesas
40	27.78	30.84	38.48	32.37	A. medianas
200	31.36	27.86	27.66	28.96	A. finas
base	13.72	12.06	14.88	13.55	Limos/arcillas
	100.00	99.70	99.54	99.75	

Tab 15 Resumen de tamizado en campo de Tlayacapan, Morelos. Elaboración propia.



Fig 132 Mallas de tamizadora con las masas retenidas de la tierra de Tlaxco, Tlaxcala, posterior a la evaluación de tamizado en laboratorio. Fotografía del autor.

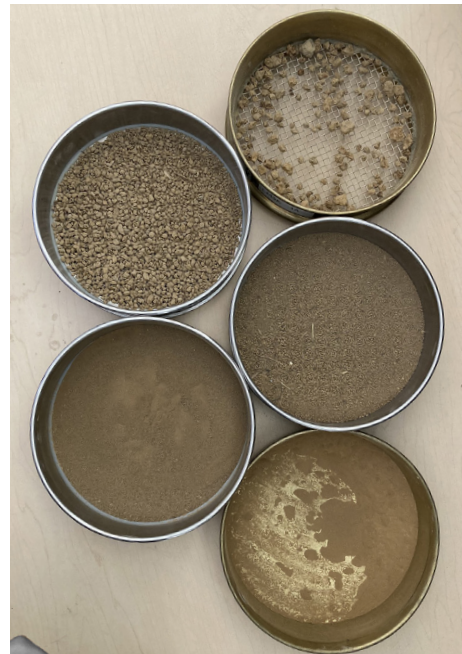


Fig 133 Mallas de tamizadora posterior a la evaluación de la tierra de Tlayacapan, Morelos. Fotografía del autor.

Evaluación de Composición: Tamizado en Laboratorio					
Tierra de:		Muestreo	Cantidad de material		
Atltzayanca, Tlaxcala		Promedio	500 gramos		
Malla	M1	M2	M3	Porcentaje retenido promedio	Clasificación
#	Porcentaje retenido %	Porcentaje retenido %	Porcentaje retenido %	Porcentaje retenido promedio %	
4	51.52	11.06	30.26	30.95	Gravas
10	20.54	22.12	24.24	22.30	A. gruesas
40	15.54	30.70	25.24	23.83	A. medianas
200	10.74	26.66	15.46	17.62	A. finas
base	1.78	9.24	4.68	5.23	Limos/arcillas
	100.12	99.78	99.88	99.93	

Tab 16 Resumen de tamizado en laboratorio de la tierra de Atltzayanca, Tlaxcala. Elaboración propia.

Evaluación de Composición: Tamizado en Campo					
Tierra de:		Muestreo	Cantidad de material		
Atltzayanca, Tlaxcala		Promedio	500 gramos		
Malla	M1	M2	M3	Porcentaje retenido promedio	Clasificación
#	Porcentaje retenido %	Porcentaje retenido %	Porcentaje retenido %	Porcentaje retenido promedio %	
4	11.34	2.27	0.82	4.81	Gravas
10	27.72	5.54	20.08	17.78	A. gruesas
40	29.56	5.91	42.34	25.94	A. medianas
200	25.18	5.04	28.22	19.48	A. finas
base	6.02	1.20	8.18	5.13	Limos/arcillas
	99.82	19.96	99.64	73.14	

Tab 17 Resumen de tamizado en campo de Atltzayanca, Tlaxcala. Elaboración propia.



Fig 134 Material retenido por las mallas de la tamizadora después de la prueba de composición en laboratorio. Fotografía del autor.

Tanto el tamizado en laboratorio como en campo, **para los 3 casos** analizados, **arrojaron porcentajes por encima del 65% para el agregado grueso**, que compone la grava y los 3 tamaños de arenas: gruesas, medias y finas. Con esta información se establecerían las **3 tierras como de grano grueso** por lo que **no se deberían realizar las pruebas de límites de consistencia** por estar enfocadas a tierras (o suelos) de grano fino. Sin embargo, como en las pruebas de clasificación preliminar sí se había conseguido realizar el cordón de la prueba 1 y 5, (con excepción de la tierra de Atltzayanca), se decidió verificar esta información, por lo que **a las 3 tierras se les realizaron las pruebas aplicables a los suelos de grano fino**.

8,9. Sedimentación

A diferencia de la prueba de la evaluación por tamizado, la prueba de sedimentación permite **separar los finos**. La decantación de la tierra se da en orden descendente de acuerdo con el tamaño y peso de las partículas, comenzando por las arenas, los limos y las arcillas. Si bien, el tamaño de los limos y las arcillas puede ser similar, **al estar en contacto con el agua, las arcillas se activan**, lo que evita que decanten junto con los limos, cuya respuesta ante el agua es nula.

En el caso de **Tlaxco**, el porcentaje de **gruesos pasó del 84% al 40.87%**, lo que refiere que, a pesar de los 2 procesos de disgregación, aún había **terrones** que por su tamaño se clasificaron dentro de las gravas o arenas pero que, **al disolverse en agua, su masa se dividió entre los finos**. En este caso, el porcentaje de arcilla

es mayor al de los limos. Ubicando los porcentajes correspondientes en el diagrama triangular de las clases texturales, se observa que esta **tierra es franco-arcillosa**.

Evaluación de Composición: Sedimentación de campo					
Tierra de:		Cantidad de material			
Tlaxco, Tlaxcala		1/2 frasco de vidrio			
Tiempo transcurrido	Componente	Porcentaje M1	Porcentaje M2	Porcentaje M3	Porcentaje Promedio
0:00	Inicial				
0:00:15	Arenas/Grava	42.11%	41.86%	38.63%	40.87%
0:15:00	Limo	22.81%	28.07%	25.15%	25.34%
	Arcilla	35.09%	29.82%	36.22%	33.71%
	Final	100.01%	99.75%	100.00%	99.92%

Tab 18 Resumen de sedimentación. Porcentajes de la tierra de Tlaxco, Tlaxcala. Elaboración propia.

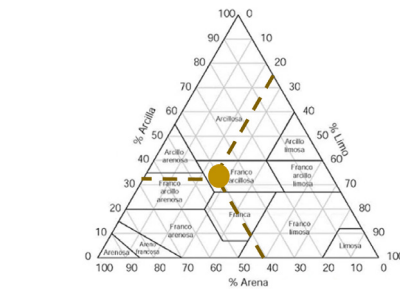


Fig 135 Los porcentajes de la prueba en el gráfico indican que es una tierra arcillosa. Elaboración propia.

En la **tierra de Tlayacapan** la diferencia entre los gruesos fue similar, pues disminuyó 38%, de **89 pasó a 51%**. Esto puede entenderse ya que, la diferencia fue en la división de los finos por la capacidad de aglomerarse de la arcilla, se ve mermada, lo cual se comprueba al observar que el **porcentaje de arcilla es del 2.63%**, quedando por debajo de los limos.

Evaluación de Composición: Promedio sedimentación					
Tierra de:		Cantidad de material			
Tlayacapan, Morelos		1/2 frasco de vidrio			
Tiempo transcurrido	Componente	Porcentaje M1	Porcentaje M2	Porcentaje M3	Porcentaje Promedio
0:00	Inicial				
0:00:15	Arenas/Grava	59.21%	45.45%	48.48%	51.05%
0:15:00	Limo	39.50%	28.79%	22.73%	30.34%
	Arcilla	0.67%	25.76%	22.73%	16.38%
	Final	99.38%	100.00%	93.94%	97.77%

Tab 19 Resumen de sedimentación. Porcentajes de la tierra de Tlayacapan, Mor. Elaboración propia.

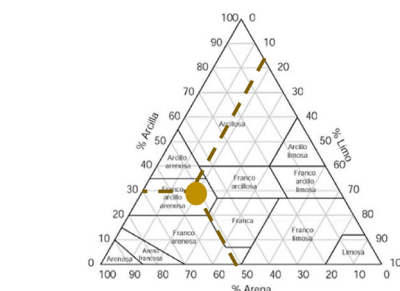


Fig 136 El gráfico clasifica la tierra como franco areno-arcillosa. Elaboración propia.

Al **comparar** los resultados de **sedimentación y tamizado** en la tierra de Atltzayanca se encuentra que el **porcentaje de gruesos** en la sedimentación **disminuyó en un 10%** con relación al tamizado en **laboratorio**, pero **aumentó en un 15%** frente al tamizado **de campo**. La diferencia entre los tamizados y la presencia de más arcillas que limos en los finos se correlaciona entendiendo que, las **gravas retenidas en la malla 4**, podrían ser en **realidad arcillas**, pero que por la fuerza de cohesión que tienen, no se disgregaron ni partieron en trozos más pequeños, a fin de pasar como arenas.

Evaluación de Composición: Promedio sedimentación					
Tierra de:		Cantidad de material			
Atltzayanca, Tlaxcala		1/2 frasco de vidrio			
Tiempo transcurrido	Componente	Porcentaje M1	Porcentaje M2	Porcentaje M3	Porcentaje Promedio
0:00	Inicial				
0:00:15	Arenas/Grava	89.85%	78.79%	81.82%	83.49%
0:15:00	Limo	4.35%	12.12%	7.58%	8.02%
	Arcilla	5.80%	9.09%	10.60%	8.50%
	Final	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Tab 20 Porcentajes de la prueba de sedimentación de la tierra de Atltzayanca, Tlaxcala. Elaboración propia.

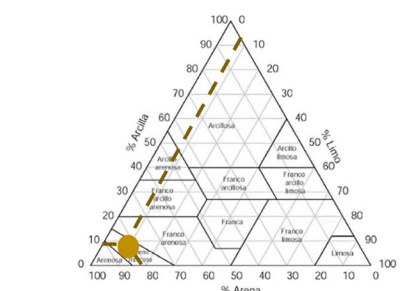


Fig 137 Por los porcentajes y el gráfico, se clasifica esta tierra como arenosa. Elaboración propia.

6.1.4 Consistencia

El **límite líquido de la tierra de Tlaxco** se encontró en **30.11%** usando la **copa de Casagrande** y el procedimiento de la norma, mientras que al seguir el procedimiento para la práctica **en campo se ubicó en 33.32%**, lo que da una **diferencia de 3.21%**. Para obtener el límite plástico se observó que ambos procedimientos eran similares, salvo por algunas especificaciones extra por lo que, a partir de una prueba se obtuvieron los resultados para ambos procedimientos, teniendo el **límite plástico en 22.42**. Por lo tanto, la **diferencia entre el índice de plasticidad** obtenido con pruebas **de laboratorio** y con pruebas de **campo es de 3.22**, misma que en el límite líquido. Al pasar los resultados en la carta de plasticidad se observa que la diferencia entre ambos resultados resulta insignificante y se clasifica en ambos casos como **arcillosa de baja plasticidad (CL)**.



Fig 138 Prueba del límite plástico lograda. Fotografía del autor.

Evaluación de Consistencia: Límites en Laboratorio				
Tierra de:		Muestreo	Cantidad de material	
Tlaxco, Tlaxcala		Promedio	500 gramos	
Prueba	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Resultado promedio
#	%	%	%	%
Lim. Líquido	30.54	29.08	30.70	30.11
Lim. Plástico	25.44	25.02	16.81	22.42
Índice de Plasticidad	5.10	4.06	13.89	7.68
				7.68

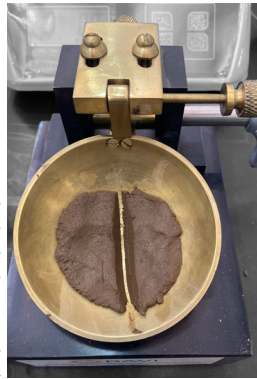


Fig 139 Copa de Casagrande para límite líquido. Fotografía del autor.

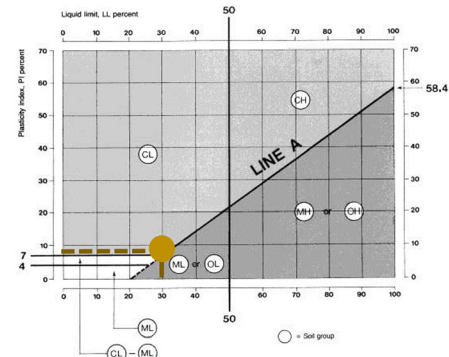


Fig 140 Carta de plasticidad que indica una tierra arcillosa de baja plasticidad. Elaboración propia.

Tab 21 Resultados de los límites de consistencia en 3 muestreos. Elaboración propia.

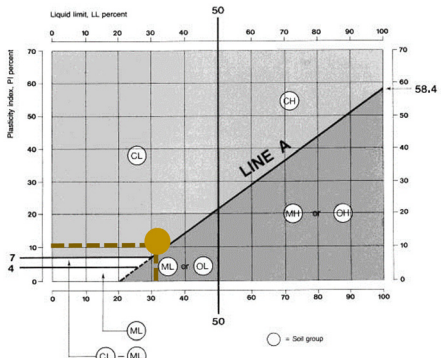


Fig 141 Carta de plasticidad que coincide con los resultados de laboratorio. Elaboración propia.



Fig 142 Prueba equivalente a la Copa de Casagrande. Fotografía del autor.



Fig 143 Prueba del límite plástico tras 2 rollos de 3mm. Fotografía del autor.

Evaluación de Consistencia: Límites en Campo				
Tierra de:		Muestreo	Cantidad de material	
Tlaxco, Tlaxcala		Promedio	500 gramos	
Prueba	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Resultado promedio
#	%	%	%	%
Lim. Líquido	32.47	33.47	34.02	33.32
Lim. Plástico	25.44	25.02	16.81	22.42
Índice de Plasticidad	7.03	8.45	17.21	10.90
				10.90

Tab 22 Resultados de los límites de consistencia en 3 muestreos. Elaboración propia.

La **diferencia** que se encontró al determinar el **límite líquido de la tierra de Tlayacapan** corresponde al **10%**, en **laboratorio fue el 47.93%** y en **campo el 37.77%**, esto a pesar de que las diferencias entre resultados por tipo de prueba son mayores

al **30%**. El **límite plástico** nuevamente se obtuvo a partir de **una prueba de 3 muestras**, para ambos casos en cada uno de los muestreos. Este quedó establecido en **33.45**. Sin embargo, a pesar de repetir la prueba en más de 1 ocasión, la **variación de más del doble** en el límite plástico dio como **resultados negativos** al momento de obtener el índice de plasticidad. A pesar de ello, con los **promedios de los límites se obtuvo el índice de plasticidad**, cuya diferencia correspondía a la obtenida en el límite líquido. De acuerdo con la carta de plasticidad, los resultados arrojan una **tierra del tipo ML, limosa de baja plasticidad**.



Fig 144 Prueba del límite plástico. Fotografía del autor.

Evaluación de consistencia: Límites en laboratorio				
Tierra de:		Muestreo	Cantidad de material	
Tlayacapan, Morelos		Promedio	500 gramos	
Prueba	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Resultado promedio
#	%	%	%	%
Lim. Líquido	37.34	68.76	37.70	47.93
Lim. Plástico	43.28	23.61	52.90	33.45
Índice de Plasticidad	-5.94	45.15	-15.20	19.61
				14.49



Fig 145 Copa de Casa-grande para límite líquido. Fotografía del autor.

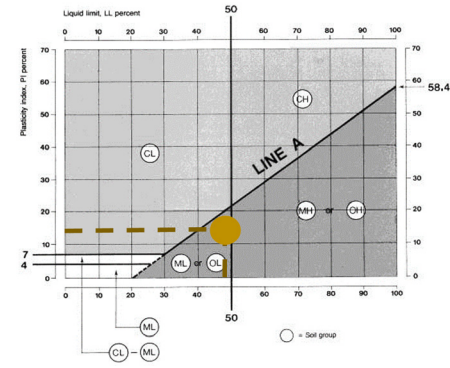


Fig 146 Carta de plasticidad que indica una tierra limosa de baja plasticidad. Elaboración propia.

Tab 23 Resultados de los límites de consistencia en 3 muestreos. Elaboración propia.

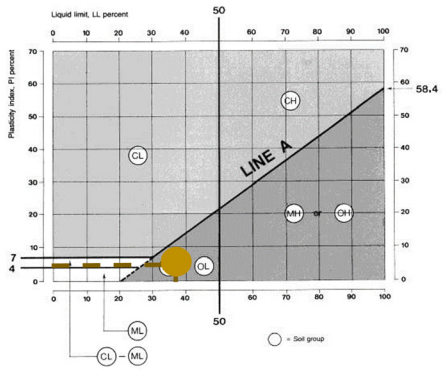


Fig 147 Carta de plasticidad que coincide en el resultado con la prueba de laboratorio, a pesar de tener datos distintos. Elaboración propia.

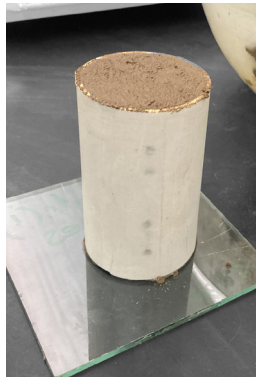


Fig 148 Llenado del tubo para obtener límite líquido. Fotografía del autor.



Fig 149 Prueba del límite plástico tras 3 rollos de 3mm por 10cm de longitud. Fotografía del autor.

Evaluación de consistencia: Límites en campo				
Tierra de:		Muestreo	Cantidad de material	
Tlayacapan, Morelos		Promedio	500 gramos	
Prueba	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Resultado promedio
#	%	%	%	%
Lim. Líquido	59.32	13.18	40.80	37.77
Lim. Plástico	43.28	23.61	52.90	33.45
Índice de Plasticidad	16.04	-10.43	-12.10	2.81
				4.32

Tab 24 Resultados de los límites de consistencia en 3 muestreos. Elaboración propia.

Aunque la obtención del límite líquido para la **tierra de Atltzayanca, Tlaxcala**, se logró tras repetir el procedimiento varias veces, **la diferencia entre los resultados de laboratorio es del 8%**, mientras que la de las **pruebas de campo aumenta a 10.35%**. La prueba para obtener el **límite plástico no pudo llevarse a cabo** ya que en ningún caso se consiguió el cordón de 3mm solicitado, como lo sucedido en las pruebas de clasificación preliminar. Ante esto, **no se puede obtener el tipo de tierra** a partir de la carta de plasticidad.

Evaluación de consistencia: Límites en laboratorio				
Tierra de:	Muestreo		Cantidad de material	
Atltzayanca, Tlaxcala	Promedio		500 gramos	
Prueba	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Resultado promedio
#	%	%	%	%
Lim. Líquido	29.68	32.14	37.80	33.21
Lim. Plástica	-	-	-	-
Índice de Plasticidad	sin registro	sin registro	sin registro	sin registro

Tab 25 Resultados de los límites de consistencia en 3 muestreos. Elaboración propia.



Fig 150 Prueba del límite plástico no lograda, llegando a 7mm de espesor. Fotografía del autor.

Al no conseguirse el límite plástico, no se puede calcular el índice de plasticidad. Por lo anterior, resulta imposible clasificar este suelo con la carta de plasticidad.

Fig 151 Copa de Casagrande para límite líquido. Fotografía del autor.



Fig 152 Restos de la prueba de límite plástico. Disgregación de la tierra al perde humedad. Fotografía del autor.

Al no conseguirse el límite plástico, no se puede calcular el índice de plasticidad. Por lo anterior, resulta imposible clasificar este suelo con la carta de plasticidad.

Fig 153 Prueba de LMSE para límite líquido. Fotografía del autor.



Evaluación de consistencia: Límites en campo				
Tierra de:	Muestreo		Cantidad de material	
Atltzayanca, Tlaxcala	Promedio		500 gramos	
Prueba	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Resultado promedio
#	%	%	%	%
Lim. Líquido	32.38	37.85	42.73	37.65
Lim. Plástica	-	-	-	-
Índice de Plasticidad	sin registro	sin registro	sin registro	sin registro

Tab 26 Resultados de los límites de consistencia en 3 muestreos. Elaboración propia.

6.1.5 Contracción

14.PC Límite de contracción

Se observó que, en los 3 casos, la **contracción sufrida en la probeta prismática era menor que en la probeta cuadrada**. La tierra con menos contracción fue la de Atltzayanca, mientras que la de Tlayacapan sufrió un mayor cambio volumétrico. Se observa que la prueba de sedimentación, se observa que posterior a la prueba, la muestra de tierra había aumentado entre un 9 y un 18% su tamaño. Y aunque esta expansión fue similar a la presentada en la tierra de Tlaxco, la cantidad de arcilla que esta contiene es mayor, por lo que se entiende que **la tierra de Tlayacapan es la más expansiva**. Este resultado también se puede **correlacionarse con su límite plástico** que, al ser más alto, tenía mayor cantidad de agua y, por tanto, esta característica se vio más afectada.

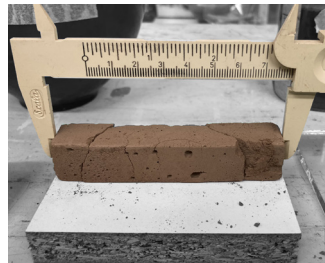


Fig 154 Contracción con tierra de Tlaxco. Fotografía del autor.

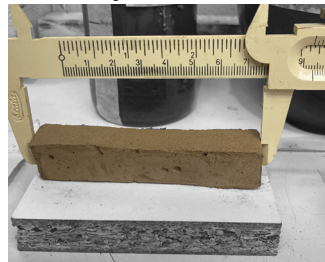


Fig 155 Contracción tierra Tlayacapan. Fotografía del autor.

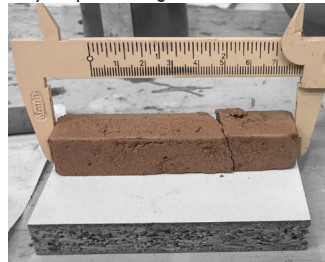


Fig 156 Contracción muestra de Atltzayanca. Fotografía del autor.

Límite de contracción		
Tierra de:	Tlaxco, Tlaxcala	
M1 % Contracción	M2 % Contracción	M3 % Contracción
4.55	14.30	15.60
Promedio		
11.48%		

Tab 27 Contracción en probeta prismática (M1) y en probetas cuadradas. Elaboración propia.

Límite de contracción		
Tierra de:	Tlaxco, Tlaxcala	
M1 % Contracción	M2 % Contracción	M3 % Contracción
4.55	14.30	15.60
Promedio		
11.48%		

Tab 28 Porcentaje de contracción en probeta prismática y en cuadradas. Elaboración propia.

Límite de contracción		
Tierra de:	Tlaxco, Tlaxcala	
M1 % Contracción	M2 % Contracción	M3 % Contracción
4.55	14.30	15.60
Promedio		
11.48%		

Tab 29 Promedio de contracción indiferente de las características de la probeta. Elaboración propia.

6.1.6 Cohesión

Se encontró que **la tierra con mayor cohesión fue la de Tlaxco**, logrando longitudes de 9.08 cm en promedio. En el tercer ensayo se alcanzaron longitudes mayores, pero se omitieron ya que la diferencia con las anteriores era de más de 1 cm. Con estos resultados, donde pudo **influir el tiempo de amasado**, es que se corrobora la necesidad de repetir la prueba las veces necesarias para obtener un **mínimo de 10 muestras**. De acuerdo con la equivalencia de la prueba, esta tierra es apta para **morteros de pega o pajarcilla**.

Lo mismo sucedió con la **tierra de Tlayacapan**, aunque con los primeros 2 ensayos se obtuvieron resultados consistentes entre ellos, los resultados del tercer ensayo se desviaron de los anteriores. Nuevamente se omitieron. En este caso, se encontró que la tierra sería **apta para su uso en adobes o bajareque**.

La tierra con **mayor constancia** en esta prueba, pero con la **menor cohesión** fue la de **Atltzayanca**. Al registrar longitudes entre 3 y 4 cm, se puede utilizar esta **tierra para tapias o COB**.

Promedio Cohesión: Churrometría		
Tierra de:	Tlaxco, Tlaxcala	
Primer Ensayo (cm)	Segundo Ensayo (cm)	Tercer Ensayo (cm)
8.70	9.30	14.50
7.50	9.10	15.00
9.90	8.70	14.90
9.30	9.20	-
9.90	9.90	-
8.30	9.10	-
Promedio		
9.08		
Técnica constructiva		
Pajarcilla/Morteros de pega		

Tab 30 Resultados de prueba de cohesión en la tierra de Tlaxco. Elaboración propia.

Promedio Cohesión: Churrometría		
Tierra de:	Tlayacapan, Morelos	
Primer Ensayo (cm)	Segundo Ensayo (cm)	Tercer Ensayo (cm)
7.90	7.10	10.50
6.50	7.60	11.00
9.00	7.00	11.20
8.20	7.80	-
7.00	7.20	-
7.40	7.50	-
Promedio		
8.19		
Técnica constructiva		
Adobe/Bajareque		

Tab 31 Resultados de prueba de cohesión para la tierra de Tlayacapan. Elaboración propia.

Promedio Cohesión: Churrometría		
Tierra de:	Atltzayanca, Tlaxcala	
Primer Ensayo (cm)	Segundo Ensayo (cm)	Tercer Ensayo (cm)
3.50	4.00	3.50
3.00	4.20	3.30
3.70	3.50	3.00
3.60	3.60	3.70
3.50	3.60	3.20
3.20	3.50	3.00
Promedio		
3.48		
Técnica constructiva		
Tapial/COB		

Tab 32 Resultados de la tierra de Atltzayanca. Elaboración propia.

6.1.7 Identificación final

Las pruebas de **clasificación preliminar** indican que la **tierra de Tlaxco** corresponde a una tierra **arcillosa de baja plasticidad**. Por su cuenta, aunque de las pruebas de composición, la de **tamizado** la identifica como de **grano grueso**, se tomarán los resultados obtenidos de la **sedimentación** que corresponde a **franco arcillosa**, mientras que los **límites de consistencia** coinciden con clasificarla como **CL**. Por último, la prueba de **cohesión** indica que se puede utilizar **para pajarcilla** o morteros de pega, esto debido a la fuerza de cohesión de la arcilla. Como se puede observar, todas las pruebas indican que se cuenta con una **tierra mayormente arcillosa**. Por tanto, a partir de este punto, se nombrará "**Tierra arcillosa**" a la tierra proveniente de Tlaxco Tlaxcala.

Resultados obtenidos - Hoja resumen									
Tierra de:	Tlaxco, Tlaxcala		FRANCO ARCILLOSA LIMOSA / CL (arcillosa de baja plasticidad)						
SUCS	Clases texturales de USDA		Clasificación SUCS	Propiedades de suelo				SUCS	
Pruebas de campo	Diagrama Triangular de clases texturales básicas		Gráfico de Plasticidad Modificada					Pruebas de campo	
ML			Arenoso fino (0.25-0.1mm)	SP	Menos de 10% de finos				SP
				SP-SM	De 5 a 10% de finos				SP
				SM	Más de 10% de finos				SM
			Arenoso muy fino (0.1-0.05mm)	SM	Baja plasticidad				SM
				ML	Poca o ninguna plasticidad				
			Arenoso grueso (1-0.5mm)	SP-GW	Menos de 5% de finos				SP
				SP-SM	De 5 a 12% de finos				SP
				SM	Más de 12% de finos				SM
			Arenosos francos	SM	De ninguna plasticidad a ligeramente plásticos				SM
				SM	Ligeramente plásticos				SM
SUELOS DE GRANO FINO	ML	CL	Franco arenosos	SC	Plásticos				SC
				ML	Ligeramente plásticos				
			Franco limosos	CL	Plásticos				
				ML	Ligeramente plásticos				
			Limosos	CL	Límite líquido < 50; plásticos				
				ML-CL	Límite líquido < 50; ligeramente plásticos				
			Franco arcillosos	CH	Límite líquido < 50; arcillas de alta contracción-dilatación				
				MH	Límite líquido < 50; mica, óxido de hierro, arcilla caolínica				
			Franco arcillosos arenosos	SC	Plásticos; menos de 50% de finos				SC
				CL	Plásticos; más de 50% de finos				
SUELOS DE GRANO GRUESO	ML	CL	Arcillosos limosos arcillosos	CH	LL > 50; arcillas de alta contracción-dilatación				
				MH	LL > 50; arcillas de alta contracción-dilatación				
				CL	LL > 50; arcillas de alta contracción-dilatación				

Tab 33 Resumen de resultados de las pruebas, con las que se caracteriza la tierra de Tlaxco como arcillosa de baja plasticidad o CL por sus siglas en inglés. Elaboración propia.

Para la tierra de **Tlayacapan**, las pruebas preliminares indican una **tierra limosa** y aunque en promedio no se concluya si esta es de alta o baja plasticidad, la prueba de esta característica (bola-rollo-bola) indica que es alta. Nuevamente se tomarán los resultados de la prueba de sedimentación a pesar de lo indicado en el tamizado, con esto, por su composición se tendría una **tierra franca arenosa o bien, arenosa muy fina**. Los **límites de consistencia** la ubican por debajo de la línea A, por lo que se trataría de **limosa o tierra con materia orgánica**. Sin embargo, la **cohesión** que presenta resulta más como una tierra arcillosa que arenosa y que sería **útil en adobes o bajareque**. En este caso, las pruebas en conjunto parecerían no coincidir del todo en sus resultados, pero al colocarlos en la hoja resumen realizada con base en el análisis de clasificaciones de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura por sus siglas en inglés)¹⁹⁰, se puede definir esta **tierra como limosa de baja plasticidad**, como se le hará referencia en este documento.

Resultados obtenidos-Hoja resumen									
Tierra de:	Tlayacapan, Morelos		ML (limosa de alta plasticidad)						
SUCS	Clases texturales de USDA		Clasificación SUCS	Propiedades de suelo				SUCS	
Pruebas de campo	Diagrama Triangular de clases texturales básicas		Gráfico de Plasticidad Modificada					Pruebas de campo	
ML			Arenoso fino (0.25-0.1mm)	SP	Menos de 10% de finos				SP
				SP-SM	De 5 a 10% de finos				SP
				SM	Más de 10% de finos				SM
			Arenoso muy fino (0.1-0.05mm)	SM	Baja plasticidad				SM
				ML	Poca o ninguna plasticidad				
			Arenoso grueso (1-0.5mm)	SP-GW	Menos de 5% de finos				SP
				SP-SM	De 5 a 12% de finos				SP
				SM	Más de 12% de finos				SM
			Arenosos francos	SM	De ninguna plasticidad a ligeramente plásticos				SM
				SM	Ligeramente plásticos				SM
SUELOS DE GRANO FINO	ML	CL	Franco arenosos	SC	Plásticos				SC
				ML	Ligeramente plásticos				
			Franco limosos	CL	Plásticos				
				ML	Ligeramente plásticos				
			Limosos	CL	Límite líquido menor de 50; plásticos				
				ML-CL	Límite líquido menor de 50; ligeramente plásticos				
			Franco arcillosos	CH	Límite líquido mayor de 50; arcillas de alta contracción-dilatación				
				MH	Límite líquido mayor de 50; mica, óxido de hierro, arcilla caolínica				
			Franco arcillosos arenosos	SC	Plásticos; menos de 50% de finos				SC
				CL	Plásticos; más de 50% de finos				
SUELOS DE GRANO GRUESO	ML	CL	Arcillosos limosos arcillosos	CH	LL > 50; arcillas de alta contracción-dilatación				
				MH	LL > 50; arcillas de alta contracción-dilatación				
				CL	LL > 50; arcillas de alta contracción-dilatación				

Tab 34 Resumen de resultados de caracterización d la tierra de Tlayacapan, Morelos. El resultado es una tierra limosa de baja plasticidad o ML por sus siglas en inglés. Elaboración propia.

En el caso de la **tierra de Atltzayanca**, las primeras pruebas indicaban que se trataba de una **tierra arenosa** y por tanto definida como de **grano grueso**. Para las pruebas de composición de corroboró esta información, la de **sedimentación** la ubicó en **franco arenosa** y para los **límites de consistencia**, esto se comprobó al no poder realizar el límite plástico en ningún caso. Su **cohesión fue baja** y por tanto se entendería que la fuerza de la arcilla es menor a las otras 2. Al discernir entre clasificarla como arenosa-arcillosa o arenosa-limosa, se retomó la única prueba que separa ambos componentes. Como la prueba de **sedimentación** indicó que el **porcentaje de arcilla era mayor** al del limo se decidió **ubicarla dentro de las tierras arenosas con cementante arcilloso SC**. Bajo esa denominación, acuñada en principio por Casagrande, se nombrará la tierra de Atltzayanca en las futuras pruebas de esta investigación.

Resultados obtenidos									
Tierra de:		FRANCO ARENOSA CON ARCILLA / SC (arenosa con cementante arcilloso)							
SUCS		Clases texturales de USDA		Clasificación SUCS		Propiedades de suelo		SUCS	
Pruebas de campo		Diagrama Triangular (Sedimentación) de clases texturales básicas		Gráfica de Plasticidad Modificada				Pruebas de campo	
ML			Arenoso fino (0.25-0.1mm)	SP	Menos de 10% de finos			SP	SUELOS DE GRANO GRUESO
				SP-SM	De 5 a 10% de finos			SP	
				SM	Más de 10% de finos			SM	
			Arenoso muy fino (0.1-0.05mm)	SM	Baja plasticidad			SM	
				ML	Poca o ninguna plasticidad				
				SP-GW	Menos de 5% de finos			SP	
			Arenoso grueso (1-0.5mm)	SP-SM	De 5 a 12% de finos			SP	
				SM	Más de 12% de finos			SM	
			Arenosos francos	SM	De ninguna plasticidad a ligeramente plásticos			SM	
				SM	Ligeramente plásticos			SM	
			Franco arenosos	SC	Plásticos			SC	
SUELOS DE GRANO FINO	ML	CL	Franco limosos	ML	Ligeramente plásticos				
				CL	Plásticos				
	ML	CL	Limosos	ML	Ligeramente plásticos				
				CL	Límite líquido menor de 50; plásticos				
	ML	CL	Franco arcillosos limosos	ML-CL	Límite líquido menor de 50; ligeramente plásticos				
				CH	Límite líquido mayor de 50; arcillas de alta contracción-dilatación				
		MH		MH	Límite líquido mayor de 50; mica, óxido de hierro, arcilla caolínica				
			Franco arcillosos arenosos	SC	Plásticos; menos de 50% de finos				SC
		CL		CL	Plásticos; más de 50% de finos				
		CH	Arcillosos limosos arcillosos	CH	LL > 50; arcillas de alta contracción-dilatación				
			MH	LL > 50; arcillas de alta contracción-dilatación					
	CL		CL	LL > 50; arcillas de alta contracción-dilatación					

Tab 35 Resultados de todas las pruebas de caracterización, las cuales indican que la tierra de Atltzayanca, Tlaxcala es arenosa con cementante arcilloso o SC por sus siglas en inglés. Elaboración propia.

6.2 EVALUACIÓN DE VARIABLES A FLEXIÓN

Se realizaron un total de **58 pruebas, divididas en 5 series**. En cada serie se analizó la influencia de un tipo de estabilización, con **3 probetas por cada variación** (ver tabla 35). La variación con mejor desempeño mecánico sirvió como base para la mezcla de las series subsecuentes. Todas las probetas se **realizaron en el mismo molde de madera**, fabricado específicamente para estas pruebas, y por la misma persona, siguiendo el mismo procedimiento de llenado en 3 capas varilladas y **compactadas con un pisón de madera**, con excepción de la **estabilización mecánica**, donde se utilizó una **prensa hidráulica**. Se dejaron secar a la sombra hasta que su peso no variará en más del 1%, lo que se logró en un promedio de 21 días.

A partir de los resultados de un primer muestreo se estableció tomar como **válida la carga resistida únicamente a los 5 mm de desplazamiento** (1 min) y no buscar la falla de las probetas, ya que, a pesar de que visualmente la pieza estaba completamente deformada, el cosido de las fibras seguía mostrando resistencia ante la carga aplicada. Tras analizar las **gráficas carga-deflexión**, en promedio, el

estado **plástico de la pajarcilla comenzaba en este punto**, además de que, la desviación estándar en el módulo de ruptura era menor que al tomarlo hasta la carga máxima reportada. Por lo tanto, los resultados presentados se deben tomar como la **resistencia de la pajarcilla dentro de su estado de servicio y no en su estado límite de falla**.

Variables		A flexión		A compresión			
Estabilización	Serie	# probetas	total	# probetas	total		
1. Física (Densidad)	Densidad alta (100kg/m3)	Evaluadas junto con la estabilización mecánica		3	9		
	Densidad media (900kg/m3)			3			
	Densidad baja (800kg/m3)			3			
2. Mecánica (Método de compactación)	Densidad alta	Manual	3	18	No aplica		
		Mecánica	3				
	Densidad media	Manual	3				
		Mecánica	3				
	Densidad baja	Manual	3				
		Mecánica	3				
3. Por armazón (Longitud de fibra)	Fibras <5cm		3	12	No aplica		
	Fibras de 5-10cm		3				
	Fibras <10cm		3				
	Fibras de 10-15cm		3				
	Fibras menores <15cm		Anterior etapa				
4. Química (agregados estabilizantes)	Sin estabilizante		3	12	12		
	15% mucilago de nopal		3				
	20% pasta de cal		3				
	15% mucilago+20% pasta		3				
5. Homogenea (tipo de tierra)	Arcillosa		5	16	Anterior etapa	6	
	Limosa		5		3		
	Arenosa		3		-		
	Arenosa cribaa		3		3		
Total de probetas		85		58		27	

Tab 36 Pruebas por serie a flexión y compresión. Elaboración propia.

6.2.1 Estabilización física y mecánica (compactación y densidad)

	Manual densidad 800				Prensa densidad 800				Manual densidad 900				Prensa densidad 900				Manual densidad 1000				Prensa densidad 1000			
Probetas	800-M1	800-M2	800-M3	800-P1	800-P2	800-P3	900-M1	900-M2	900-M3	900-P1	900-P2	900-P3	1000-M1	1000-M2	1000-M3	1000-P1	1000-P2	1000-P3						
Densidad	799.45	850.12	730.10	823.67	820.89	861.10	923.47	870.88	959.82	934.82	945.43	983.32	1015.92	961.21	956.01	933.87	1044.71	965.33						
Des. Es Densidad	60.25				22.45				44.72				25.50				33.19				57.12			
Densidad promedio kg/m3	793.22				835.22				918.06				954.53				977.72				981.30			
Carga resistida a 5mm de deflexión (kgf)	21.00	30.00	25.00	26.00	24.00	26.00	24.00	21.00	32.00	22.00	27.00	19.00	30.00	29.00	21.00	25.00	28.00	35.00						
Des. Es Carga resistida a 5mm	4.51				1.15				5.69				4.04				4.93				5.13			
Promedio de carga resistida a 5mm de deflexión (kgf)	25.33				25.33				25.67				22.67				26.67				29.33			
Módulo de ruptura a 5mm de deflexión (Mpa)	0.34	0.45	0.34	0.38	0.35	0.41	0.32	0.30	0.46	0.34	0.39	0.29	0.53	0.48	0.33	0.33	0.44	0.51						
Des. Es Módulo de ruptura	0.06				0.03				0.08				0.05				0.11				0.09			
Promedio de módulo de ruptura a 5mm de deflexión	0.38				0.38				0.36				0.34				0.45				0.43			

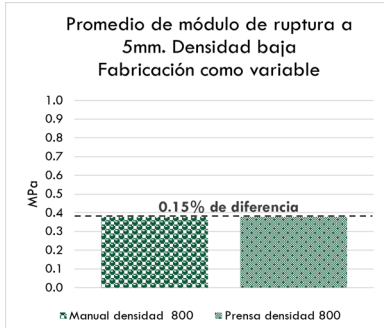
Tab 37 Resultados de probetas a flexión con estabilización física y mecánica. Elaboración propia.



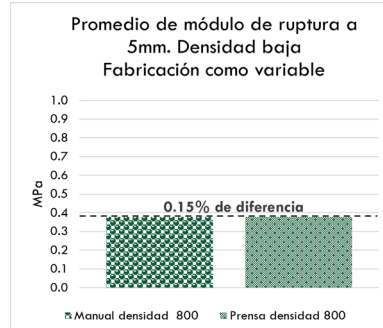
Fig 157 Compactación con prensa hidráulica. Fotografía del autor.

Al cambiar únicamente el proceso de compactación y no la densidad, se observa que, en lugar de tener un aumento en la capacidad de carga de la pajarcilla, en los 3 casos de variación en la densidad, la **resistencia de la pajarcilla fue ligeramente menor** cuando se compactaba con la prensa hidráulica. Se postula que

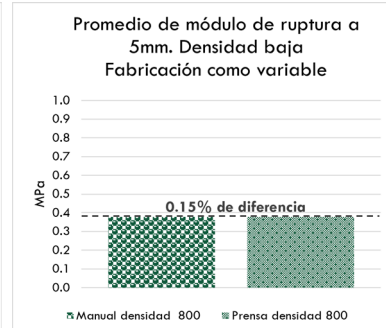
esta disminución puede deberse a que al compactar toda la mezcla de un solo paso y no realizar el varillado, el amarre entre las fibras de la mezcla es menor, por lo que la resistencia de la pieza recaería casi por completo en la barbotina. Una **ventaja** que mostró la compactación en prensa es **la reducción de la variación en la densidad**, al menos en las densidades de 800 y 900 kg/m³.



Gra 2 Módulo de ruptura en densidad 800, compactación variable. Elaboración propia.

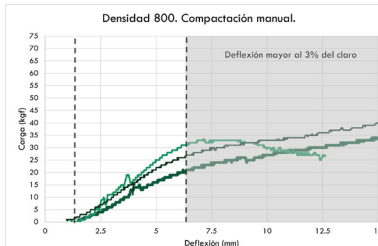


Gra 3 Módulo de ruptura en densidad 900, compactación variable. Elaboración propia.

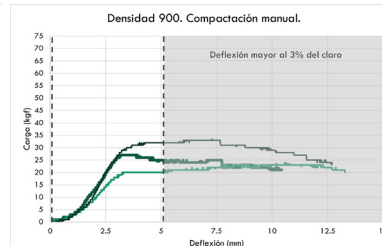


Gra 4 Módulo de ruptura en densidad 1000, compactación variable. Elaboración propia.

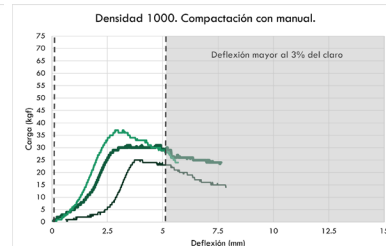
El aumento de densidad, independientemente del método de compactación que se utilice, resultó si tener un **impacto favorable en la resistencia de la pajarcilla**. Aunque las 3 densidades analizadas entran en la densidad alta de las clasificaciones de la tierra aligerada, se demostró que **pasando de 800-1000kg/m³** en la densidad de las probetas, se **lograba un aumento**, en el módulo de ruptura, **del 17%** cuando se compactan de forma manual y del 12% cuando se realiza con prensa hidráulica.



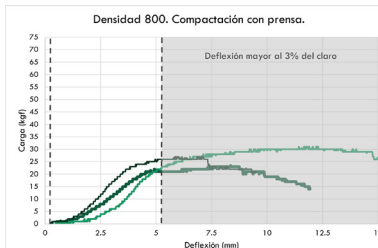
Gra 5 Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con densidad 800 compactadas manualmente. Elaboración propia.



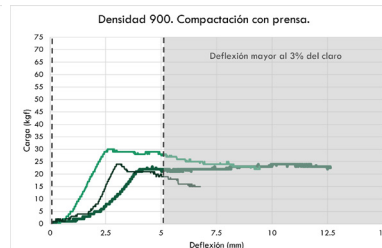
Gra 6 Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con densidad 900 compactadas manualmente. Elaboración propia.



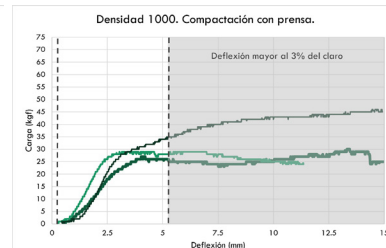
Gra 7 Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con densidad 1000 compactadas manualmente. Elaboración propia.



Gra 8 Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con densidad 800 compactadas con prensa. Elaboración propia.



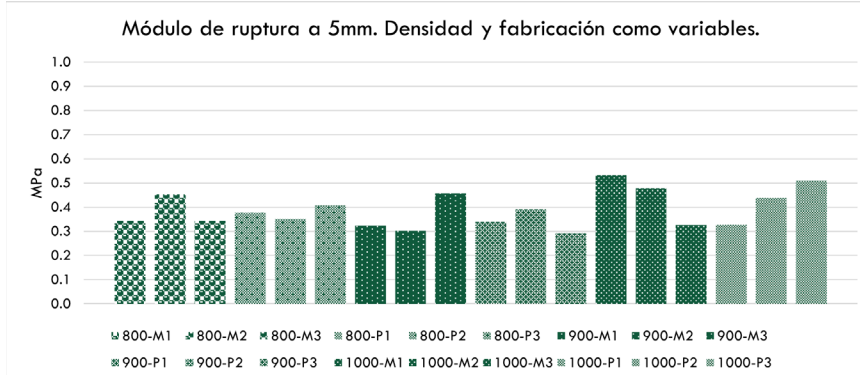
Gra 9 Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con densidad 900 compactadas con prensa. Elaboración propia.



Gra 10 Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con densidad 1000 compactadas con prensa. Elaboración propia.

En esta serie, se obtuvieron **resistencias desde los 2.98 hasta los 5.44kg/cm²**, cuyo equivalente en carga aplicada es entre los **19 y 30kgf**. El promedio de resistencia más alto se dio en la combinación de **compactación manual y densidad de 100kg/m³**. La combinación menos favorable se da al utilizar una densidad de

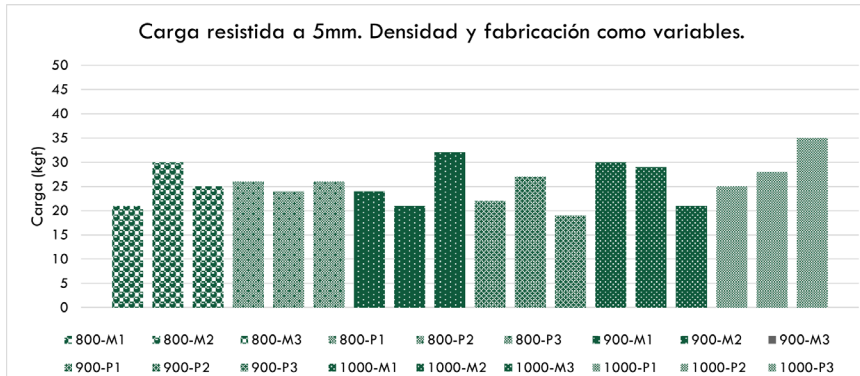
900kg/m³ y compactar con prensa hidráulica. Llama la atención que la de densidad 800kg/m³ compactada con prensa haya resistido 10% más, pero también en esta densidad se encontró la menor resistencia entre las probetas compactadas a mano, por lo que la respuesta a esta anomalía pueda encontrarse al analizar y probar otras variables como la fibra.



Gra 11 Módulo de ruptura de las 18 probetas evaluadas a flexión. Serie de estabilización física y mecánica. Elaboración propia.



Fig 158 Piezas posterior a la evaluación. Fotografía del autor.



Gra 12 Carga resistida a 5mm de deflexión de las 18 probetas evaluadas a flexión. Serie de estabilización física y mecánica. Elaboración propia.

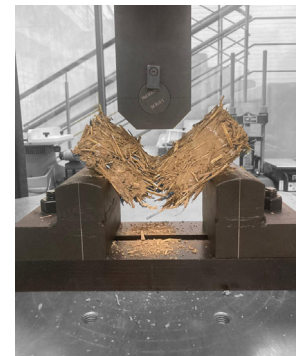
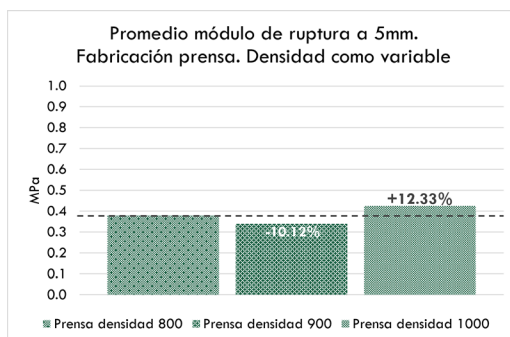
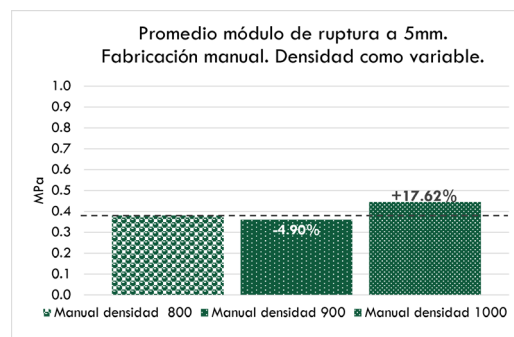


Fig 159 Pieza fallada. Fotografía del autor.

Se entiende que **controlando la densidad se tiene un mayor manejo de la resistencia en la pajarcilla**, por tanto, si se propicia el amarre entre las fibras cuando se compacta con prensa, se podría equiparar su resistencia con la obtenida con la compactación manual, con la ventaja de un mayor control de la densidad y por tanto un mejor manejo de la resistencia de la pajarcilla. Para este caso, como el método de compactación con prensa no incrementó el desempeño mecánico, se de-



Gra 13 Módulo de ruptura en las 3 densidades compactando manualmente. Elaboración propia.



Gra 14 Módulo de ruptura en las 3 densidades compactado con prensa hidráulica. Elaboración propia.

terminó **continuar con el método de compactación manual**, mientras que para la densidad se estableció **continuar las probetas subsecuentes con la densidad de 800kg/m³**, en búsqueda de una **mezcla** que fuera lo suficientemente **resistente, pero sin tener un peso alto** que representase dificultad en la práctica constructiva. Ambos criterios se usaron como base para las probetas siguientes.

	Manual densidad baja			Manual densidad media			Manual densidad alta		
Probetas	800-M1	800-M2	800-M3	900-M1	900-M2	900-M3	1000-M1	1000-M2	1000-M3
Densidad promedio kg/m ³	793.22			918.06			977.72		
Promedio de módulo de ruptura a 5mm de deflexión	0.38			0.36			0.45		
Ganancia	X			-0.02		Mpa	0.07		Mpa
				-4.90%			17.62%		

Tab 38 Tabla comparativa de la serie física y mecánica, probetas compactadas manualmente. Elaboración propia.

	Prensa densidad baja			Prensa densidad media			Prensa densidad alta		
Probetas	800-P1	800-P2	800-P3	900-P1	900-P2	900-P3	1000-P1	1000-P2	1000-P3
Densidad promedio kg/m ³	835.22			954.53			981.30		
Promedio de módulo de ruptura a 5mm de deflexión	0.38			0.34			0.43		
Ganancia	X			-0.04		Mpa	0.05		Mpa
				-10.12%			12.33%		

Tab 39 Tabla comparativa de la serie física y mecánica, probetas compactadas manualmente. Elaboración propia.



Fig 160 Piezas evaluadas en esta serie. Fotografía del autor.



Fig 161 Pieza durante evaluación. Fotografía del autor.

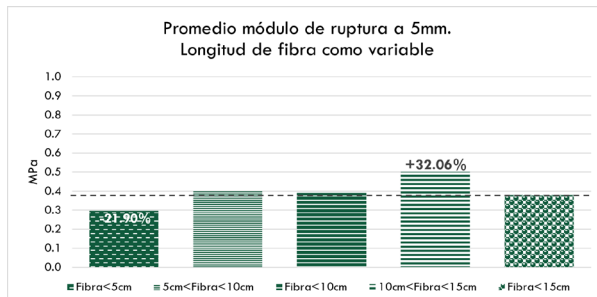
6.2.2 Estabilización por armazón (longitud de fibra)

	Fibra<5cm			5cm<Fibra<10cm			Fibra<10cm			10cm<Fibra<15cm			Fibra<15cm		
Probetas	P5-M1	P5-M2	P5-M3	P5-10-M1	P5-10-M2	P5-10-M3	P10-M1	P10-M2	P10-M3	P10-15-M1	P10-15-M2	P10-15-M3	P15-M1	P15-M2	P15-M3
Densidad	822.97	828.42	834.07	761.15	712.92	769.51	758.12	748.35	735.53	737.51	880.94	750.63	850.12	799.45	730.10
Des. Es Densidad	5.55			30.55			11.33			79.29			60.25		
Densidad promedio kg/m ³	828.49			747.86			747.33			789.70			793.22		
Carga resistida a 5mm de deflexión (kgf)	12.00	18.00	23.00	32.00	23.00	29.00	24.00	25.00	24.00	43.00	30.00	26.00	25.00	16.00	22.00
Des. Es Carga resistida a 5mm	5.51			4.58			0.58			8.89			4.58		
Promedio de carga resistida a 5mm de deflexión (kgf)	17.67			28.00			24.33			33.00			21.00		
Módulo de ruptura a 5mm de deflexión (Mpa)	0.21	0.29	0.39	0.46	0.35	0.39	0.40	0.42	0.35	0.62	0.47	0.42	0.34	0.45	0.34
Des. Es Módulo de ruptura	0.09			0.05			0.03			0.11			0.06		
Promedio de módulo de ruptura a 5mm de deflexión	0.30			0.40			0.39			0.50			0.38		

Tab 40 Resultados de probetas a flexión con estabilización por armazón. Elaboración propia.

En principio se observa que **utilizar únicamente fibras de una medida** establecida, que sea mayor a la longitud menor de la probeta, (de **5-10cm** o de **10-15cm**) **resulta en una mayor resistencia a flexión**, comparado con las probetas donde se mezclaron fibras de diversos tamaños (cuando eran menores a 10 y 15cm). Esto se explica al entender que, en la pajarcilla, la fibra absorbe los esfuerzos a tensión que suceden en la flexión, por lo que, **al tener fibras que abarquen la longitud de la probeta se propicia un agarre de extremo a extremo**. Pero al existir diversos

tamaños, el amarre que pueden lograr las fibras largas se ve interrumpido por las fibras más cortas además de que los espacios entre fibras se estarían llenando con más fibra, mientras que, en el caso de **utilizar únicamente fibras largas, existe mayor oportunidad de que la barbotina aglutine la mezcla** al insertarse entre ellas.



Gra 15 Módulo de ruptura promedio por longitud de fibra. Elaboración propia.

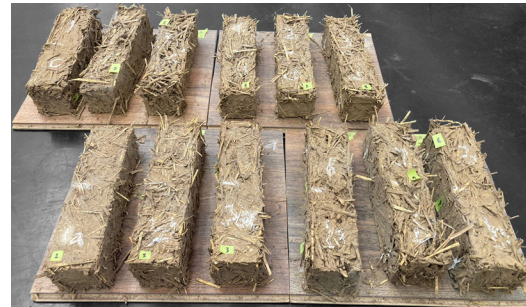
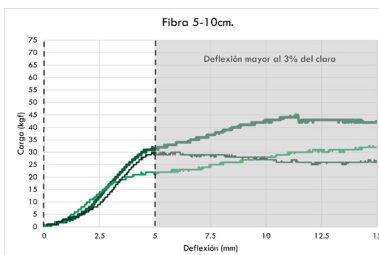
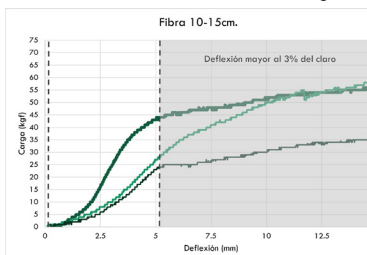


Fig 162 Probetas de la serie por armazón. Fotografía del autor.



Gra 16 Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con fibras medianas (entre 5 y 10cm). Elaboración propia.



Gra 17 Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con fibras largas (entre 10 y 15cm). Elaboración propia.

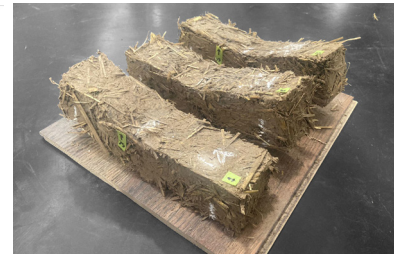
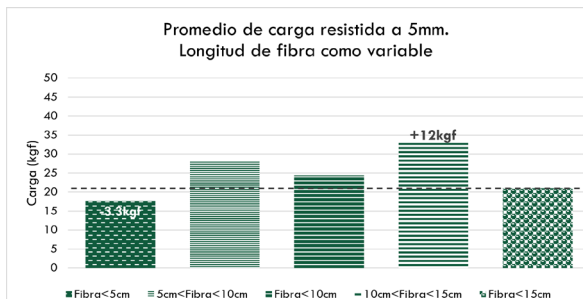


Fig 163 Deflexión de piezas después de la evaluación. Fotografía del autor.

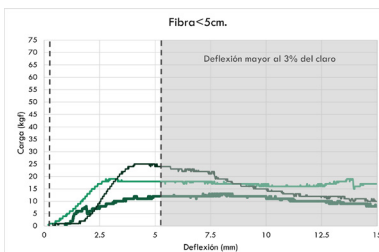
A pesar de que la literatura indica que la longitud máxima de la fibra a utilizar en bloques o prefabricados de pajarcilla debe ser **igual o menor a la medida menor de la pieza** buscada, en esta evaluación se observó que es justo con este criterio donde se obtuvieron los **resultados más bajos**. Como una de las ventajas que tiene la pajarcilla para los prefabricados es la reducción de peso y que la respuesta



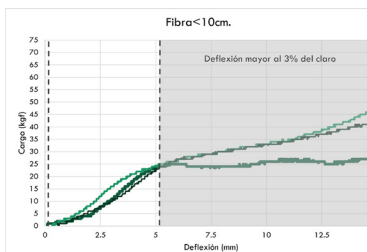
Gra 18 Carga resistida en promedio por longitud de fibra. Registros a 5mm de deflexión. Elaboración propia.



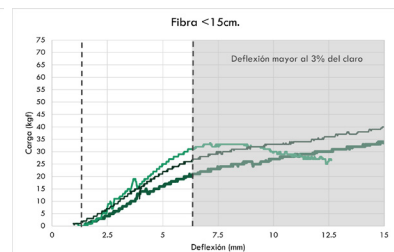
Fig 164 Inicio de prueba a flexión. Fotografía del autor.



Gra 19 Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con fibras cortas (menores a 5cm). Elaboración propia.

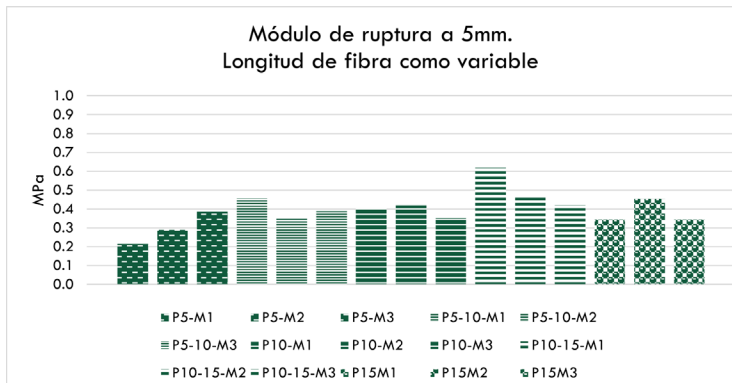


Gra 20 Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con fibras cortas y medianas (menores a 10cm). Elaboración propia.



Gra 21 Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con fibras cortas, medianas y largas (menores a 15cm). Elaboración propia.

mecánica se pasa por alto, es quizá por esa razón que se hace esa sugerencia, ya que se postula que, al **utilizar fibras demasiado cortas, no existe un refuerzo** como tal y la fibra **solo estaría actuando como agente aligerante** de la mezcla.



Gra 22 Módulo de ruptura a 5mm de deflexión de las 15 probetas evaluadas a flexión. Serie de estabilización por armazón. Elaboración propia.

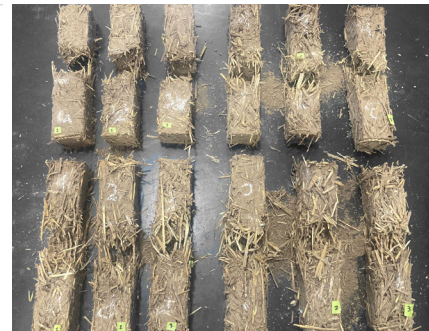
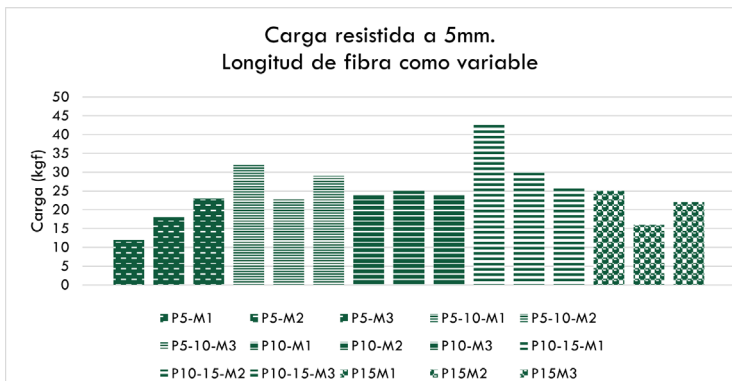


Fig 165 Piezas posterior a evaluación. Fotografía del autor.

Las **resistencias** registradas en esta serie fueron **desde los 2.19 kg/cm² hasta los 6.32 kg/cm²**, o bien de **12 a 43kgf resistidos**. Tanto las **resistencias más altas** por probeta y por promedio se dieron utilizando fibras de 10-15cm, mientras que las probetas 3 probetas más bajas se encuentran al utilizar fibras menores a 5cm y fibras menores a 15cm, tomadas de la primera serie. Con las fibras menores a 10cm se obtuvieron los resultados con menor desviación entre probetas, pero su promedio continúa por debajo del uso de fibras larga únicamente. El único **inconveniente** que se presentó en las **probetas de fibras largas fue la variación en la densidad**, cuya desviación es de casi 80kg/m³, a pesar de ello, la resistencia de las 3 probetas de esta variación, se encontraron por encima de las demás.



Gra 23 Carga resistida a 5mm de deflexión de las 15 probetas evaluadas a flexión. Serie de estabilización por armazón. Elaboración propia.



Fig 166 Deflexión de 5mm en la probeta. Fotografía del autor.

En la serie anterior se encontró que aumentar la densidad promovía un aumento en la resistencia a flexión de la pajarcilla en un 17%, pero que se decidió continuar con densidades bajas (800kg/m³) a fin de promover piezas ligeras para el prefabricado. Con el análisis de los resultados de esta serie, se encontró que el **control del tamaño de fibra aumenta esa resistencia en un 32%**, con lo que, a pesar de tener piezas menos densas, se pueden **lograr resistencias equivalentes o por encima de mezclas con una densidad mayor**. Se concluye que, delimitar la longitud

de las fibras a un tamaño mínimo y máximo promueve el amarre en todo lo largo de la probeta, por lo que se estableció **utilizar fibras entre 10 y 15cm**, junto con el método de **compactación manual y la densidad de 800kg/m³** para las probetas de las siguientes series.

	Fibra<5cm			5cm<Fibra<10cm			Fibra<10cm			10cm<Fibra<15cm			Fibra<15cm		
Probetas	P5-M1	P5-M2	P5-M3	P5-10-M1	P5-10-M2	P5-10-M3	P10-M1	P10-M2	P10-M3	P10-15-M1	P10-15-M2	P10-15-M3	P15M1	P15M2	P15M3
Densidad promedio kg/m ³	828.49			747.86			747.33			789.70			793.22		
Promedio de módulo de ruptura a 5mm de deflexión	0.30			0.40			0.39			0.50			0.38		
Ganancia	-0.08 Mpa			0.02 Mpa			0.01 Mpa			0.12 Mpa			X		
	-21.90%			4.95%			3.02%			32.06%					

Tab 41 Tabla comparativa de la serie por armazón. Elaboración propia.

6.2.3 Estabilización química (mucílago de nopal y pasta de cal)

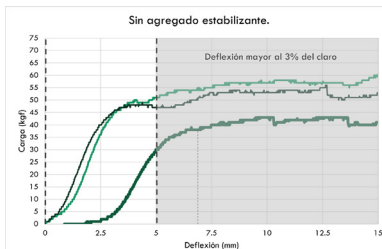
	Fibra<5cm			5cm<Fibra<10cm			Fibra<10cm			10cm<Fibra<15cm			Fibra<15cm		
Probetas	P5-M1	P5-M2	P5-M3	P5-10-M1	P5-10-M2	P5-10-M3	P10-M1	P10-M2	P10-M3	P10-15-M1	P10-15-M2	P10-15-M3	P15M1	P15M2	P15M3
Densidad	822.97	828.42	834.07	761.15	712.92	769.51	758.12	748.35	735.53	737.51	880.94	750.63	850.12	799.45	730.10
Des. Es Densidad	5.55			30.55			11.33			79.29			60.25		
Densidad promedio kg/m ³	828.49			747.86			747.33			789.70			793.22		
Carga resistida a 5mm de deflexión (kgf)	12.00	18.00	23.00	32.00	23.00	29.00	24.00	25.00	24.00	43.00	30.00	26.00	25.00	16.00	22.00
Des. Es Carga resistida a 5mm	5.51			4.58			0.58			8.89			4.58		
Promedio de carga resistida a 5mm de deflexión (kgf)	17.67			28.00			24.33			33.00			21.00		
Módulo de ruptura a 5mm de deflexión (Mpa)	0.21	0.29	0.39	0.46	0.35	0.39	0.40	0.42	0.35	0.62	0.47	0.42	0.34	0.45	0.34
Des. Es Módulo de ruptura	0.09			0.05			0.03			0.11			0.06		
Promedio de módulo de ruptura a 5mm de deflexión	0.30			0.40			0.39			0.50			0.38		

Tab 42 Resultados de probetas a flexión con estabilización química. Elaboración propia.

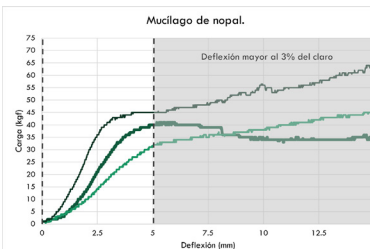


Fig 167 Preparación de agregados estabilizantes. Fotografía del autor.

El mucílago de nopal fue el estabilizante que mayor resistencia a flexión aportó a la pajarcilla, sin embargo, esa resistencia sigue estando 30% debajo de la mezcla sin estabilizante, esto a pesar de que la mezcla con mucílago de nopal presentó una densidad mayor. Lo que si se observa **en los 3 casos donde se le agregó algún estabilizante** es que los resultados, tanto por carga resistida y módulo de ruptura, tuvieron **una desviación menor** a la presentada en la mezcla sin agregado. Como se abordó en el capítulo 4.3 de este documento, el uso de estos agregados se **utiliza con fines de estandarización**, pero como se vio en las evaluaciones de esta serie, no en todos los casos, esta unificación de resultados corresponderá a un aumento en sus características mecánicas.



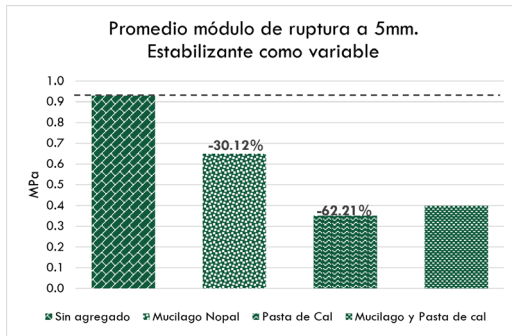
Gra 24 Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas sin agregado. Elaboración propia.



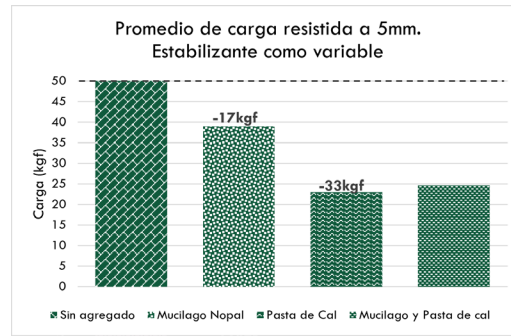
Gra 25 Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con mucílago. Elaboración propia.



Fig 168 Secado de probetas de la serie. Fotografía del autor.

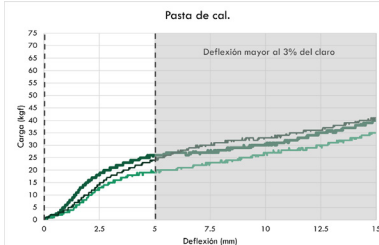


Gra 26 Módulo de ruptura de acuerdo al estabilizante. Elaboración propia.

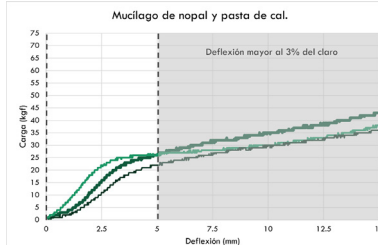


Gra 27 Módulo de ruptura por cada estabilizante. Elaboración propia.

Aunque el uso de la cal como estabilizante en la construcción con tierra está muy difundido y entre cuyos beneficios se llega a mencionar el aumento en la resistencia de los elementos constructivos de tierra, en este caso, resultó lo contrario. **Agregar pasta de cal** en la pajarcilla provocó una **disminución de la resistencia a flexión en un 51%**. Esto puede deberse a diversas situaciones que se enlistan a continuación: en primera instancia, al mezclar la tierra con cal, la demanda de agua de esta última, provoca que la tierra se seque y se genera la reacción puzolánica que hace **más resistente, pero reduce la plasticidad de la tierra**. La cal ha dado resultados favorables en técnicas donde se utiliza únicamente tierra y donde estará sometida a compresión, pero en técnicas donde se agregan fibras, y como se observó en esta prueba, donde el esfuerzo al que se somete la pajarcilla es a flexión, **la adición de la cal resulta contraproducente**¹⁹¹.



Gra 28 Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con pasta de cal. Elaboración propia.

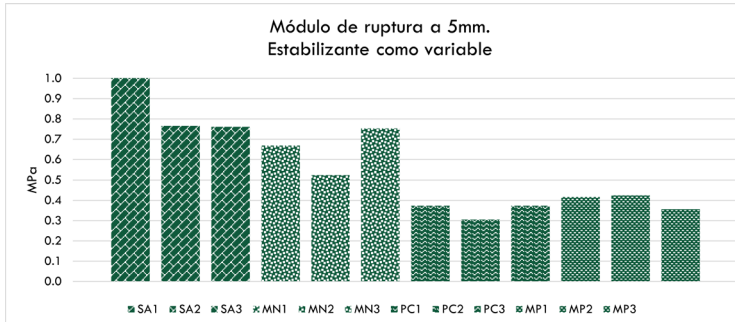


Gra 29 Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con mucilago de nopal y pasta de cal. Elaboración propia.



Fig 169 Probeta de pasta de cal donde se observa la ruptura en diagonal después de la prueba. Fotografía del autor.

Las probetas de esta serie resistieron una **carga de entre 19 y 70kgf**, por lo que las **resistencias** reportadas se dieron entre los **3.12kg/cm² y los 12.86kg/cm²**. La cal provocó una disminución en la resistencia en los 2 casos donde se agregó a la mezcla, afectando en menor medida cuando se combinó con el mucilago de nopal, donde solo redujo un 57% comparado con la mezcla simple. La **mayor desviación** entre resultados se dio en la **mezcla sin estabilizante**, la cual es de 12kgf o 2.93kg/cm², derivado de la primera probeta de esta variación, que fue la que tuvo el mayor registro. Incluso si se omitiese esa probeta por la desviación que presenta, la **mezcla simple** seguiría siendo **la de mayor módulo de ruptura**, con una diferencia del 14% con respecto a la más próxima, la de mucilago de nopal.



Gra 30 Carga resistida a 5mm de deflexión de las 15 probetas evaluadas a flexión. Serie de estabilización por armazón. Elaboración propia.



Fig 170 Prueba de la mezcla con mucilago de nopal. Se aprecia que tras los primeros 5mm de deflexión, la pieza se mantiene estable sin disgregar gran cantidad de materia. Fotografía del autor.

Las pruebas indicaron que la mezcla presenta un **mejor desempeño mecánico** a flexión cuando se compone **únicamente de los elementos principales**: agua, tierra y paja. Este hallazgo sugiere que la simplicidad en la composición puede ser clave para optimizar las propiedades mecánicas. A pesar de que se puede continuar con la evaluación de los estabilizantes químicos, modificando la concentración de estos o su adición en seco o húmedo, se optó por **continuar sin estabilización química**, y de esta forma **reportar la resistencia de la pajarcilla por sí misma**. Con estos resultados, la mezcla continuó como se estableció en la serie anterior.

	Sin agregado			Mucilago Nopal			Pasta de Cal			Mucilago y Pasta de Cal		
Probetas	SA1	SA2	SA3	MN1	MN2	MN3	PC1	PC2	PC3	MP1	MP2	MP3
Densidad promedio kg/m ³	863.90			949.58			850.00			822.53		
Promedio de módulo de ruptura a 5mm de deflexión	0.93			0.65			0.35			0.40		
Ganancia	X			-0.28 Mpa			-0.58 Mpa			-0.53 Mpa		
				-30.12%			-62.21%			-57.09%		

Tab 43 Tabla comparativa de la serie de estabilización química. Elaboración propia.

6.2.4 Estabilización homogénea (tipo de tierra)

	Arcillosa					Arenosa			Arenosa cribada			Limosa				
Probetas	ARC1	ARC2	ARC3	ARC4	ARC5	ARN1	ARN2	ARN3	ARN1.5	ARN2.5	ARN3.5	LIM1	LIM2	LIM3	LIM4	LIM5
Densidad	756.39	780.76	793.11	797.94	638.38	478.06	564.60	572.25	667.73	759.32	675.87	632.63	745.14	714.28	542.33	599.39
Des. Es Densidad	66.24					52.31			50.69			83.05				
Densidad promedio kg/m ³	753.32					538.30			700.97			646.75				
Carga resistida a 5mm de deflexión (kgf)	57.00	41.00	42.00	63.00	50.00	9.00	10.00	7.00	16.00	14.00	14.00	21.00	34.00	35.00	22.00	23.00
Des. Es Carga resistida a 5mm	9.50					1.53			1.15			6.89				
carga resistida a 5mm de deflexión (kgf)	50.60					8.67			14.67			27.00				
Módulo de ruptura a 5mm de deflexión (Mpa)	0.86	0.64	0.77	1.10	0.90	0.12	0.12	0.09	0.22	0.22	0.21	0.30	0.55	0.52	0.28	0.29
Des. Es Módulo de ruptura	0.17					0.02			0.00			0.13				
Promedio de módulo de ruptura a 5mm de deflexión	0.85					0.11			0.22			0.39				

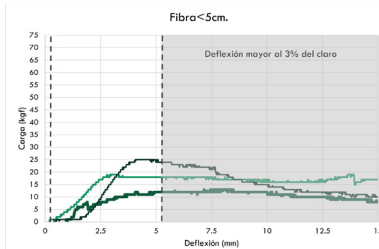
Tab 44 Resultados de probetas a flexión con diferentes tierras. Elaboración propia.



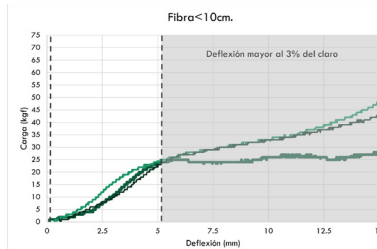
Fig 171 Elaboración de las probetas con tierra arcillosa. Fotografía del autor.

Desde el nombre de la técnica se entiende que para la pajarcilla se debe buscar una tierra arcillosa, esto se corroboró al evaluar la influencia de las características de la tierra a flexión. Es notable la **diferencia en resistencia** que reporta **la tierra arcillosa por encima de las otras 2**, superando por un 54.86% a la tierra

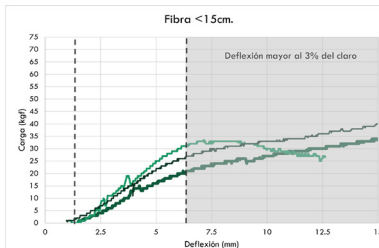
limosa y un 86% a la tierra arenosa, aunque esta diferencia también estuvo **influenciada por la densidad**, ya que la de la tierra arcillosa fue 14% y 28% respectivamente mayor. Otro aspecto para considerar es, que como en esta técnica la tierra es colocada en un estado semilíquido, **influye más la fuerza de cohesión** que la tierra muestre para mantener unidas las fibras. Esto puede **correlacionarse con la prueba de cohesividad**, donde la tierra arcillosa fue con la que se consiguieron mejores resultados.



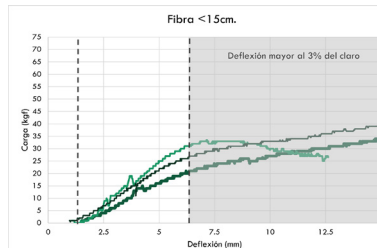
Gra 31 Gráfica carga-deflexión de las 5 probetas con tierra arcillosa. Elaboración propia.



Gra 32 Gráfica carga-deflexión de las 5 probetas con tierra limosa. Elaboración propia.



Gra 33 Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con tierra arenosa. Elaboración propia.

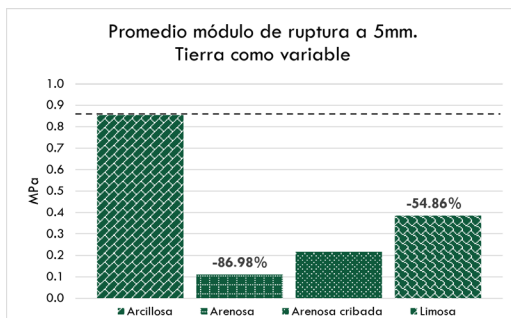


Gra 34 Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con tierra arenosa cribada. Elaboración propia.

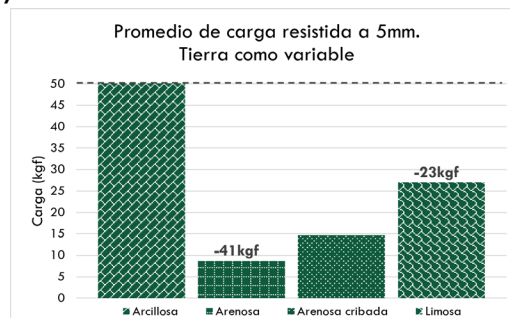


Fig 172 Secado de probetas. Arcillosas, limosas y arenosas. Inicialmente se hicieron 5 probetas arenosas, pero por la poca cohesión de la tierra solo se logró probar 3. Fotografía del autor.

Tras la fabricación de las probetas con la **tierra arenosa**, se observó que, desde la elaboración de la barbotina, la tierra se decantaba, casi sin mezclarse con el agua. Ante esta situación se optó por **separar los finos de los gruesos para elaborar otras 3 probetas** con tierra arenosa cribada. Con el cribado por una malla #16, se logró una **diferencia de resistencia de cerca del 12%**. A pesar de eso, la diferencia de resistencias entre la arcillosa y arenosa cribada es de 74 %.



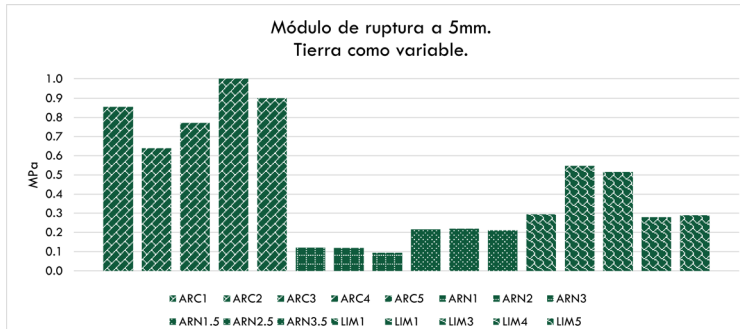
Gra 35 Módulo de ruptura en las 3 densidades compactando manualmente. Elaboración propia.



Gra 36 Módulo de ruptura en las 3 densidades compactado con prensa hidráulica. Elaboración propia.

Se mostró que **a partir de la selección de una tierra** se pueden lograr resistencias de hasta **8.72kg/cm² o de 1.13kg/cm²**, lo que se traduce en resistir **8 o 50kgf** de carga aplicada. Se remarca que en esta serie las densidades estuvieron

por debajo de los 800kg/m³, especialmente en las probetas de la tierra arenosa. En este caso, pudo deberse a la **baja interacción lograda entre la tierra y el agua** para hacer la barbotina, además de que, tras la manipulación de las probetas para su pesaje, la mezcla se disgregaba con facilidad. Mientras que las otras dos tierras (limosa y arcillosa) registraron una desviación mayor en sus densidades y, por tanto, se vio reflejada en la variación de sus resistencias y cargas resistidas.



Gra 37 Carga resistida a 5mm de deflexión de las 16 probetas evaluadas a flexión. Serie de estabilización homogénea. Elaboración propia.



Fig 173 Prueba de tierra arenosa sin cribar. Se observa que conforme se genera la deflexión, la tierra se desprende de las fibras, dejándolas sueltas. Fotografía del autor.

Con esta última serie se buscó registrar y comprobar que **no porque se hayan obtenido los resultados de las series anteriores utilizando pajarcilla, significa que utilizando cualquier tierra se logran resultados idénticos**, incluso usando una tierra igualmente caracterizada como arcillosa, estos resultados serían distintos. A pesar de ello, los datos obtenidos con la tierra limosa superan a los presentados por la tierra arcillosa en la primera serie, mientras que los de la tierra arenosa, a pesar de su baja densidad, solo están 0.82kg/cm² por debajo de las probetas donde se utilizaron fibras cortas. Esta correlación corrobora que **la manipulación y control de la densidad, el proceso de compactación y la longitud de la fibra, también tienen un papel importante en la resistencia de la pajarcilla, indiferente del tipo de tierra o sus características.**

Probetas	Arcillosa					Arenosa			Atlixayanca, Tlaxcala (#16)			Tlayacapan, Morelos				
	ARC1	ARC2	ARC3	ARC4	ARC5	ARN1	ARN2	ARN3	ARN1.5	ARN2.5	ARN3.5	LIM1	LIM2	LIM3	LIM4	LIM5
Densidad promedio kg/m ³	753.32					538.30			700.97			646.75				
Promedio de módulo de ruptura a 5mm de deflexión	0.85					0.11			0.22			0.39				
Ganancia	X					-0.74 Mpa			0.22 Mpa			0.39 Mpa				
						-86.98%			-74.77%			-54.86%				

Tab 45 Tabla comparativa de la serie de estabilización homogénea. Elaboración propia.

6.3 EVALUACIÓN DE VARIABLES A COMPRESIÓN

Un total de **27 pruebas** fueron llevadas a cabo, **divididas en 3 series**. En cada serie se examinó la influencia de un tipo de estabilización, **con 3 probetas por cada variación** (ver tabla 35). A diferencia de las evaluaciones de flexión, en este caso **no se evaluó la estabilización mecánica** ni la variación en **estabilización por armazón**. La variación con mejor desempeño mecánico sirvió como base para las mezclas de las series subsecuentes. Todas las probetas fueron **realizadas en el mismo molde de madera**, diseñado específicamente para estas pruebas, y por la

misma persona, siguiendo el mismo procedimiento de llenado en 3 capas varilladas y compactadas con un pisón de madera. Todas las mezclas llevaron **fibra cortada por debajo de los 5cm**. Se dejaron secar a la sombra hasta que su peso no variara en más del 1%, lo cual se logró en un promedio de 15 días.

Como en el caso de las pruebas a flexión interesaba conocer la resistencia de la pajarcilla, por lo que nuevamente se realizó un muestreo **aplicando la carga en razón de 5mm/min**. A partir de este muestreo se estableció tomar como **válida la resistencia de la pajarcilla hasta los 5mm**. Aunque la probeta continuaba presentando resistencia ante el aumento de carga, producto del desplazamiento de la máquina, el **aplastamiento ya superaba el 10%** de la altura de la probeta, por lo que en ningún caso se llegó a la falla total de la probeta y se **detuvieron todas las pruebas a los 20 mm** de aplastamiento. Por lo tanto, los **resultados** expuestos no representan la capacidad máxima de carga del material, pero si **se encuentran dentro de su estado de servicio**, pensando en ser aplicado en la capa de compresión.

6.3.1 Estabilización física (densidad)

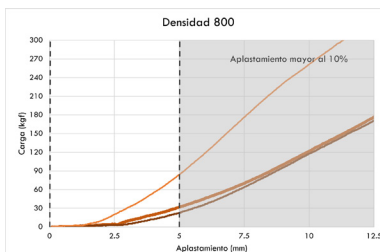
	Densidad 800			Densidad 900			Densidad 1000		
Probetas	800-M1	800-M2	800-M3	900-M1	900-M2	900-M3	1000-M1	1000-M2	1000-M3
Densidad	818.72	780.57	896.60	946.26	825.38	904.66	979.61	993.59	995.85
Des. Es Densidad	59.14			61.41			8.80		
Densidad promedio kg/m ³	831.96			892.10			989.68		
Carga máx a 5mm de desplazamiento (kgf)	31.00	23.00	85.00	57.00	140.00	79.00	105.00	118.00	109.00
Des. Es Carga resistida a 5mm	33.72			43.00			6.66		
Promedio de carga resistida a 5mm	46.33			92.00			110.67		
Resistencia a los 5mm (MPa)	0.12	0.09	0.33	0.23	0.55	0.30	0.41	0.48	0.42
Des. Resistencia a 5mm	0.13			0.17			0.03		
Promedio de resistencia a 5mm (Mpa)	0.18			0.36			0.44		

Tab 46 Resultados de probetas a compresión con estabilización física. Elaboración propia.

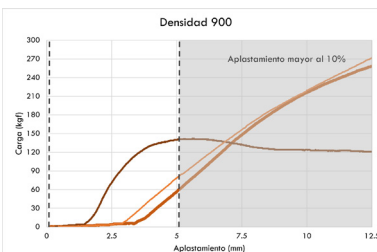


Fig 174 Piezas de evaluación a compresión por densidad. Fotografía del autor.

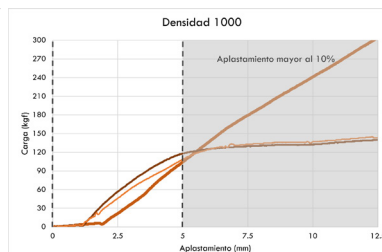
Como ocurrió en la prueba a flexión, el **aumento de densidad** también implicaba un **aumento en la resistencia de la mezcla**. A compresión este aumento resultó mayor, ya que la **diferencia** entre la densidad 800 y la de 900 fue de **más del doble** y comparada con la densidad mayor, la de 1000kg/m³ esta diferencia aumentaba a 2.4 veces. Otro aspecto a favor de la **densidad 1000**, fue que la **variación** en su densidad fue la **más baja**, tan solo de 8.80kg/m³, mientras que, en las otras dos densidades, la variación fue de cerca de los 60kg/m³.



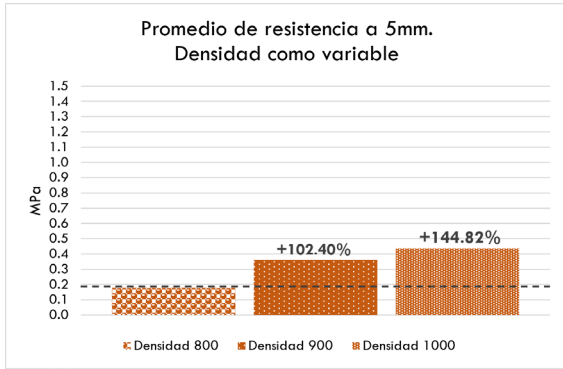
Gra 38 Carga-aplastamiento de las probetas con densidad 800. Elaboración propia.



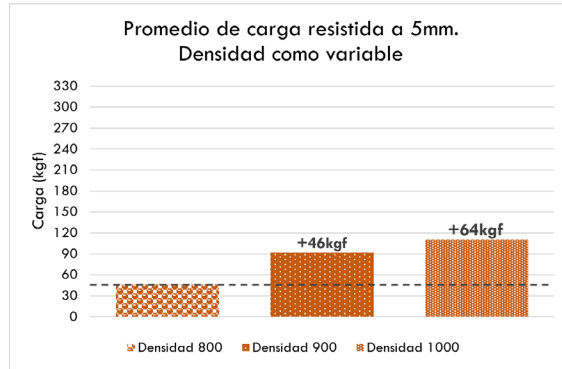
Gra 39 Carga-aplastamiento de las probetas con densidad 900. Elaboración propia.



Gra 40 Carga-aplastamiento de las probetas con densidad 1000. Elaboración propia.

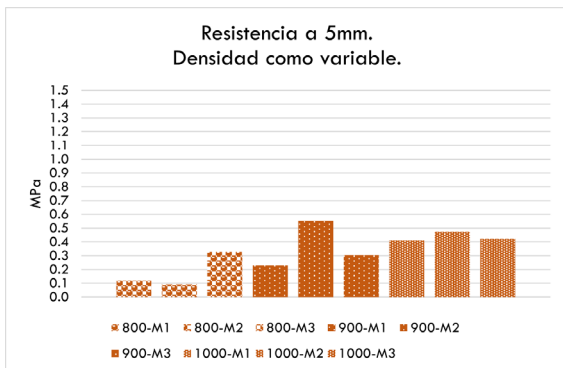


Gra 41 Resistencia por densidad a 5mm de aplastamiento. Elaboración propia.

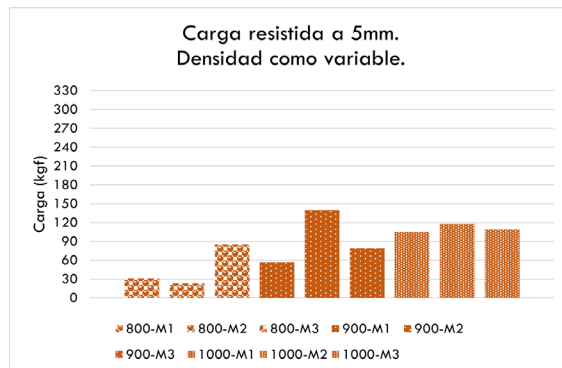


Gra 42 Carga resistida a 5mm de aplastamiento. Elaboración propia.

Los **resultados** de esta serie fueron desde **0.90-5.64kg/cm²**, lo que representa que resistieron de **23 a 140kgf** de carga aplicada. Como se vio en las series a flexión, al **mantener constante la densidad se consigue esa misma constancia en los resultados**, como ocurrió en las probetas de densidad 1000kg/m³. Llama la atención que una probeta de la densidad 800kg/m³ fue la que alcanzó la mayor carga resistida (147 kgf) de todas las probetas de la serie, pero como sus resultados son muy variables, el promedio de estas variaciones fue el más bajo. Esta **variación** en los datos presentados en las probetas de densidad **800kg/m³** se puede deber a que, al tener menos tierra con relación a la paja, la **probeta presenta irregularidades** en su forma, lo que provoca una aplicación excéntrica de la carga.



Gra 43 Resistencia a 5mm por probeta a compresión. Serie de estabilización física. Elaboración propia.



Gra 44 Carga resistida a compresión a 5mm de aplastamiento. Serie de estabilización física. Elaboración propia.

A diferencia de las pruebas a flexión, donde la mezcla evaluada se utilizaría en las piezas prefabricadas y por lo cual, se buscaba tener una densidad lo más baja posible, **en estas pruebas se seleccionó la de mayor resistencia sin importar el aumento de densidad** que conllevara. Esto se debe a que la mezcla evaluada a compresión será la misma que se plantea ocupar para la capa de compresión, la cual tendrá un espesor de 5cm e irá vertida una vez puestas las piezas, por lo que el aumento de peso que represente **utilizar mezclas de densidad de 1000kg/m³** no es un aspecto que **afecte directamente el desempeño de los trabajadores** ni un sobrepeso en el entrepiso.

Probetas	Densidad baja			Densidad media			Densidad alta		
	800-M1	800-M2	800-M3	900-M1	900-M2	900-M3	1000-M1	1000-M2	1000-M3
Densidad promedio kg/m ³	831.96			892.10			989.68		
Promedio de resistencia a 5mm (Mpa)	0.18			0.36			0.44		
Ganancia	X			0.18 Mpa			0.26 Mpa		
				102.40%			144.82%		

Tab 47 Tabla comparativa de la serie a compresión de estabilización física. Elaboración propia.



Fig 175 Prueba a compresión. Fotografía del autor.

6.3.2 Estabilización química (mucílago de nopal y pasta de cal)

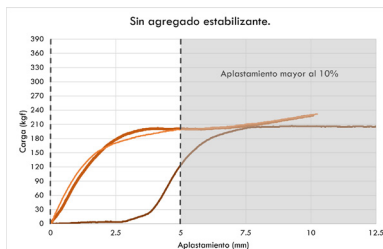
Probetas	Sin agregado			Mucílago Nopal			Pasta de Cal			Mucílago y Pasta		
	SA1	SA2	SA3	MN1	MN2	MN3	PC1	PC2	PC3	MP1	MP2	MP3
Densidad	1047.42	1035.79	1045.26	1102.78	1076.94	1087.55	1045.28	1020.75	1068.22	1094.25	1055.40	1095.58
Des. Es Densidad	6.19			12.99			23.74			22.82		
Densidad Promedio kg/m ³	1042.82			1089.09			1044.75			1081.75		
Carga máx a 5mm de desplazamiento (kgf)	201.00	125.00	199.00	336.00	331.00	275.00	186.00	189.00	178.00	154.00	163.00	167.00
Des. Es Carga resistida a 5mm	43.31			33.87			5.69			6.66		
Promedio de carga resistida a 5mm	175.00			314.00			184.33			161.33		
Resistencia a los 5mm (MPa)	0.79	0.49	0.78	1.32	1.30	1.08	0.73	0.74	0.70	0.60	0.64	0.65
Des. Es Modulo de ruptura	0.17			0.13			0.02			0.03		
Promedio de resistencia a 5mm (Mpa)	0.69			1.23			0.72			0.63		

Tab 48 Resultados de probetas a compresión con estabilización química. Elaboración propia.

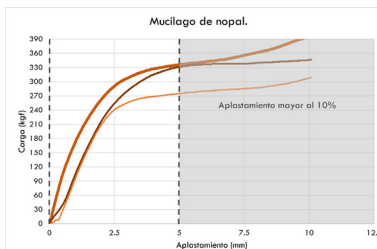


Fig 176 Secado de piezas para evaluación a compresión por estabilizante químico. Fotografía del autor.

En comparación con las pruebas a flexión, en este caso **agregar únicamente 15% de mucílago de nopal** en el agua de la mezcla, ayudó a tener un **aumento en la resistencia de 79%** en comparación a la mezcla sin estabilizante. Sin embargo, debido a la complejidad que representa el análisis de un estabilizante de origen vegetal **se optó por descartarlo**, haciendo énfasis que el estudio de este estabilizante puede llevar al aumento de la resistencia en la pajarcilla, **cuidando** en todo momento, la **proliferación de hongos**, producto de la humedad que retiene el mucílago de nopal. De igual forma, la **pasta de cal provocó un aumento de casi el 6%**, pero al utilizarla en combinación con el mucílago de nopal esta se ve reducida 7% por debajo de la mezcla sin estabilizante.



Gra 45 Carga-aplastamiento de las probetas sin agregado estabilizante. Elaboración propia.



Gra 46 Carga-aplastamiento de las probetas con mucílago de nopal. Elaboración propia.

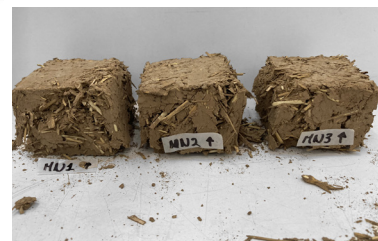
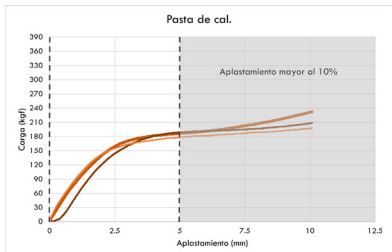
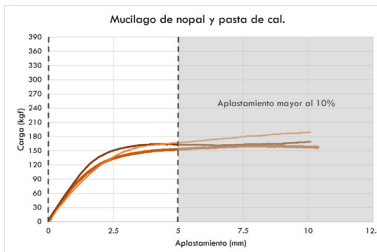


Fig 177 Probetas con 15% de mucílago de nopal, posterior a la prueba. Fotografía del autor.



Gra 47 Carga-aplastamiento de las probetas con pasta de cal. Elaboración propia.

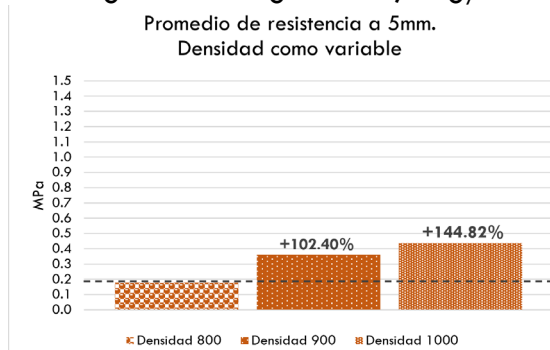


Gra 48 Carga-aplastamiento de las probetas con mucilago de nopal y pasta de cal. Elaboración propia.

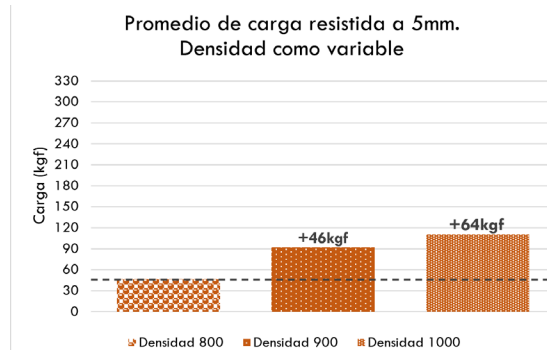


Fig 178 Probetas con 20% de pasta de cal y 15% de mucilago de nopal, después de la evaluación. Fotografía del autor.

El **mucilago de nopal** fue el **estabilizante químico** que **mayor resistencia registró**, tanto en promedio como en sus 3 probetas, siendo la más alta de 13.44kg/cm² o bien 336kgf de carga aplicada. Los **resultados más bajos se dieron al mezclar ambos estabilizantes** químicos, donde se obtuvo una resistencia promedio de 6.45kg/cm², pero sin tener entre sus tres probetas **la de menor resistencia**. Esta se encuentra en el grupo de las **probetas sin estabilizante químico**, la cual soportó una carga de 125kgf o bien, 5kg/cm².

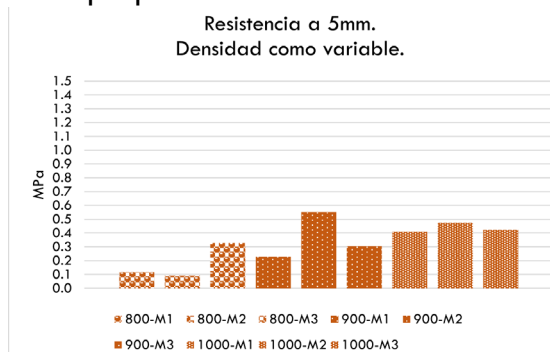


Gra 49 Resistencia a 5mm por estabilizante. Elaboración propia.

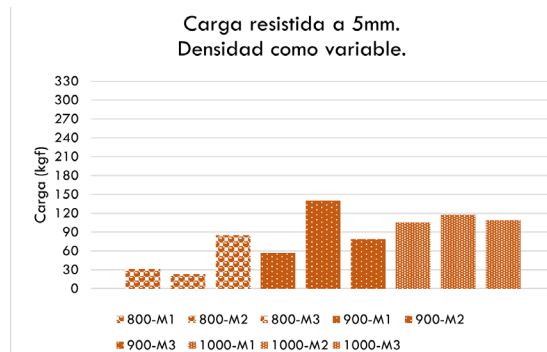


Gra 50 Carga resistida por estabilizante. Elaboración propia.

Las pruebas indican que **al agregar cualquiera de los estabilizantes** químicos evaluados, **sí se favorece la respuesta mecánica a compresión de la pajarcilla, siempre y cuando se utilicen por separado**. Por las complejidades que se expusieron respecto al uso del mucilago de nopal, se optó por no utilizarlo en la mezcla final, mientras que el uso de la pasta de cal se recomienda en una concentración muy baja (menor al 1%). Lo anterior no para aumentar su resistencia, sino para evitar la proliferación de hongos durante el secado de la mezcla, ya que, a diferencia de la mezcla de las piezas prefabricadas, esta debe colocarse ligeramente más líquida a fin de propiciar su vertido.



Gra 51 Resistencia a 5mm de aplastamiento por estabilización química. Elaboración propia.



Gra 52 Carga resistida a 5mm de compresión por estabilización química. Elaboración propia.

Probetas	Sin agregado			Mucilago Nopal			Pasta de Cal			Mucilago y Pasta		
	SA1	SA2	SA3	MN1	MN2	MN3	PC1	PC2	PC3	MP1	MP2	MP3
Densidad Promedio kg/m3	1042.82			1089.09			1044.75			1081.75		
Promedio de resistencia a 5mm (Mpa)	0.69			1.23			0.72			0.63		
Ganancia	X			0.54 Mpa			0.04 Mpa			-0.05 Mpa		
				79.43%			5.33%			-7.81%		

Tab 49 Tabla comparativa de la serie a compresión de estabilización química. Elaboración propia.

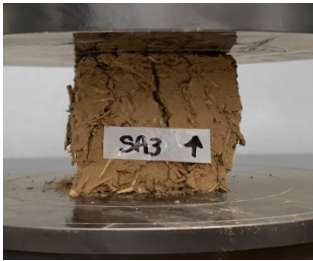


Fig 179 Prueba a compresión de mezcla sin estabilizante. Fotografía del autor.

6.3.3 Estabilización homogénea (tipo de tierra)

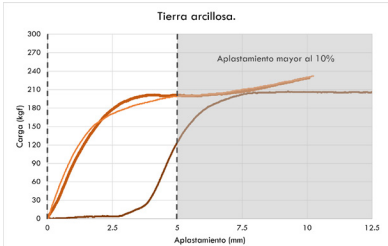
Probetas	Limosa			Arenosa cribada			Arcillosa		
	LIM1	LIM2	LIM3	ARN1	ARN2	ARN3	ARC1	ARC2	ARC3
Densidad	946.58	920.65	926.33	768.67	784.96	810.52	1013.51	1014.69	1020.55
Des. Es Densidad	13.63			21.10			3.77		
Densidad Promedio kg/m3	931.19			788.05			1016.25		
Carga máx a 5mm de desplazamiento (kgf)	178.00	167.00	115.00	31.00	27.00	36.00	153.00	121.50	154.00
Des. Es Carga resisitida a 5mm	33.65			4.51			18.48		
Promedio de carga resisitida a 5mm	153.33			31.33			142.83		
Resistencia a los 5mm (MPa)	0.69	0.66	0.44	0.12	0.11	0.14	0.60	0.48	0.60
Des. Es Modulo de ruptura	0.13			0.02			0.07		
Promedio de resistencia a 5mm (Mpa)	0.60			0.12			0.56		

Tab 50 Resultados de probetas a compresión con estabilización homogénea. Elaboración propia.

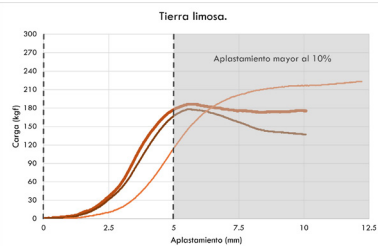


Fig 180 Secado de probetas a compresión con distintas tierras. Fotografía del autor.

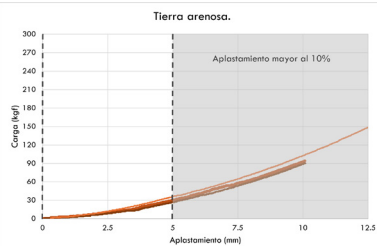
Contrario a lo que sucedió en la evaluación a flexión, **la tierra limosa fue la que mayor resistencia presentó**, aunque **solo está por encima** de la tierra arcillosa por 0.38kg/cm², equivalente al **6%**. Nuevamente la tierra arenosa, a pesar de haber sido cribada como en las probetas a flexión, sus resultados son los menos favorables, resistiendo un 79% menos, en comparación con la tierra limosa. Para entender **la buena respuesta de la tierra limosa a compresión**, se retoman los resultados de la evaluación de composición por sedimentación, donde se percibió que, a pesar de tener **un alto contenido de limos y arenas**, estas eran **en su mayoría finas**, por lo que pueden **llenar los espacios entre las fibras** cubiertas de arcillas, propiciando un reacomodo tras la compactación sufrida en la prueba.



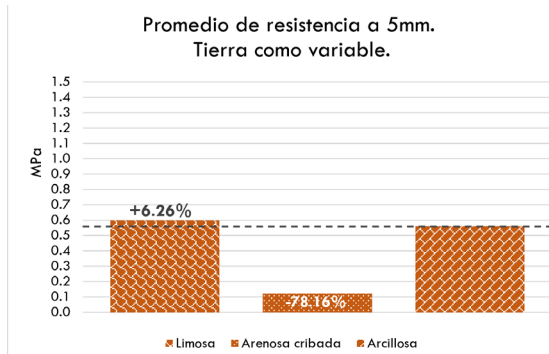
Gra 53 Carga-aplastamiento de probetas con tierra arcillosa. Elaboración propia.



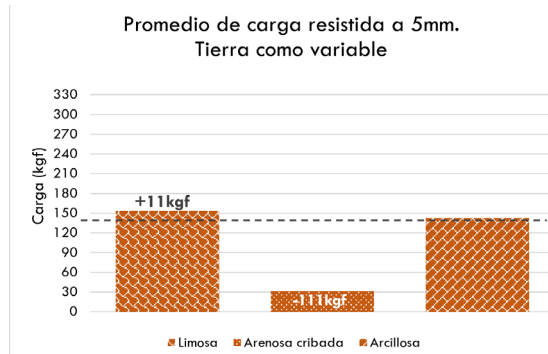
Gra 54 Carga-aplastamiento de probetas con tierra limosa. Elaboración propia.



Gra 55 Carga-aplastamiento de probetas con tierra arenosa. Elaboración propia.

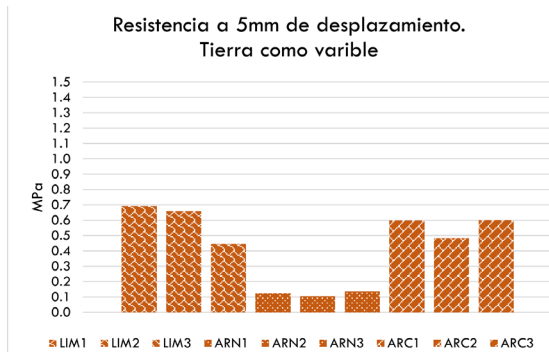


Gra 56 Resistencia a 5mm por tipo de tierra. Elaboración propia.

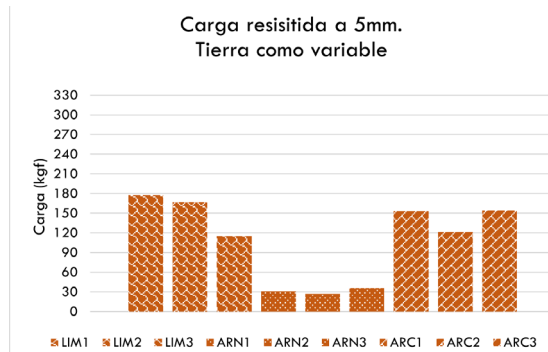


Gra 57 Carga resistida por tipo de tierra. Elaboración propia.

La **carga máxima resistida en esta serie** fue de **178kgf (7.07kg/cm²)** que, aunque es similar a la reportada en la serie anterior con la tierra arcillosa, la densidad de la probeta limosa es 11% menor. Como se mencionó, **la tierra arenosa presentó la menor resistencia**, reportada en 1.09kg/cm² (27kgf de carga resistida). A pesar de los resultados favorables con la **tierra limosa**, esta fue la que **mayor desviación presentó en sus resultados**, mientras que la arenosa fue más constante.



Gra 58 Resistencia por probeta de los 3 tipos de tierra. Elaboración propia.



Gra 59 Carga resistida por tipo de tierra en cada probeta. Elaboración propia.

Aunque se estableció la **tierra limosa como la de mayor resistencia** a compresión, la **diferencia entre esta y la arcillosa es baja**, además de que al tener una densidad de 1000kg/m³ (de la segunda serie a compresión), la **tierra arcillosa rebasa los resultados de la tierra limosa**. Finalmente se estableció que, para la capa de compresión, la **mezcla propuesta contará con una densidad de 1000kg/m³**, así como tierra arcillosa o limosa.

	Arcillosa			Arenosa cribada			Limosa		
Probetas	ARC1	ARC2	ARC3	ARN1	ARN2	ARN3	LIM1	LIM2	LIM3
Densidad Promedio kg/m ³	1016.25			788.05			931.19		
Promedio de resistencia a 5mm (Mpa)	0.56			0.12			0.60		
Ganancia	X			-0.44 MPa			0.04 MPa		
				-78.16%			6.67%		

Tab 51 Tabla comparativa de la serie a compresión de estabilización homogénea. Elaboración propia.



Fig 181 Prueba a compresión de tierra arenosa. Fotografía del autor.

6.4 EVALUACIÓN DE LA PIEZA

Se realizaron 24 pruebas en total, divididas en 2 series cuando se evaluó por desplazamiento y en 1 serie cuando se evaluó por carga. En cada serie se obtuvo el promedio de 3 muestras (ver tabla 51). Las variables evaluadas fueron la densidad, tipo de tierra además del método de evaluación con respecto a la forma de aplicación de la carga. Para obtener las piezas prefabricadas, se tuvo que diseñar y fabricar un molde de madera. Todas las piezas fueron ejecutadas por la misma persona, siguiendo el mismo procedimiento de llenado en 3 capas varilladas y compactadas con un pisón de madera, como se hizo para las probetas a flexión. Tras su fabricación, se desmoldaron inmediatamente y se dejaron secar a la sombra, hasta lograr el mismo criterio de que la variación de su peso fuera menor al 1%, lo cual se consiguió en un promedio de 21 días.

Como se mencionó en el capítulo 5.3.2, se decidió realizar la evaluación de forma escalonada hasta cumplir con lo establecido en la norma. Inicialmente, se retomó la aplicación de carga utilizada en las probetas, con un desplazamiento de 5mm/min, hasta alcanzar la carga solicitada por la norma. Posteriormente, se llevaron a cabo las evaluaciones por carga, aplicando primero los 125kgf en 2 minutos y luego en 1 minuto, siguiendo el procedimiento indicado por la norma. Tras el análisis de los datos obtenidos con el muestreo preliminar, y en búsqueda de establecer un estado límite de servicio, se retomó la NMX-C-405-ONNCCE-2014¹⁹², que al evaluar paneles para uso en losas de entrepiso 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. Mientras que, para la prueba por aplicación de carga, se detuvo la prueba una vez alcanzada la resistencia del 125kgf.

Variables			Piezas prefabricadas	
Evaluación	Serie		# pruebas	total
Por desplazamiento (5mm/min)	Densidad	800-900	3	15
		900-1000	3	
	Tierra	Arcillosa	3	
		Limosa	3	
		Arenosa	3	
Por carga (125kgf/2min)	Tierra	Arcillosa	1	3
		Limosa	1	
		Arenosa	1	
Por carga (125kgf/1min)	Tierra	Arcillosa	2	6
		Limosa	2	
		Arenosa	2	
Total de probetas			24	

Tab 52 Pruebas por serie a piezas prefabricadas. Elaboración propia.

192 Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., "Industria de la construcción -Paneles de uso estructural aplicados en sistemas constructivos- Especificaciones y métodos de ensayo", Pub. L. No. NMX-C-405-ONNCCE-2014 (2014).

6.4.1 Evaluación por desplazamiento

Densidad como variable

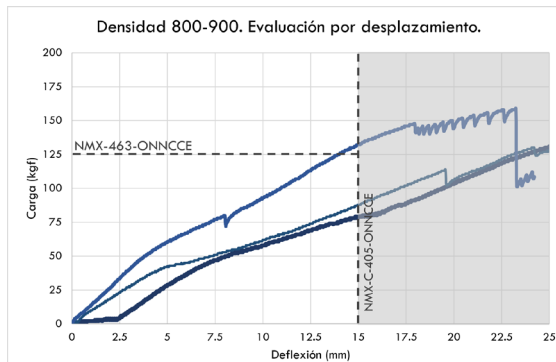
Probetas	Densidad 800-900			Densidad 900-1000		
	DEN8-9 PP1	DEN8-9 PP2	DEN8-9 PP3	DEN9-10 PP1	DEN9-10 PP2	DEN9-10 PP3
Densidad	758.99	709.89	746.71	946.31	1038.68	942.43
Des. Es Densidad	25.55			54.48		
Densidad promedio kg/m ³	738.530			975.807		
Desplazamiento a 125kgf de carga	23.673	22.970	13.887	9.506	7.210	8.629
Des. Es Desplazamiento	5.46			1.16		
Promedio de desplazamiento a 125kgf	20.177			8.448		
Carga resistida a los 15mm	79.00	88.00	133.00	144.00	138.00	156.00
Des. Es Carga resistida a 15mm	28.93			9.17		
Promedio de carga a los 15mm	100.00			146.00		
Módulo de ruptura 15mm (Mpa)	0.79	0.88	1.33	1.44	1.38	1.56
Des. Es Módulo de ruptura	0.29			0.09		
Módulo de ruptura promedio (MPa)	1.00			1.46		

Tab 53 Resultados de evaluación por desplazamiento a piezas prefabricadas. Elaboración propia.

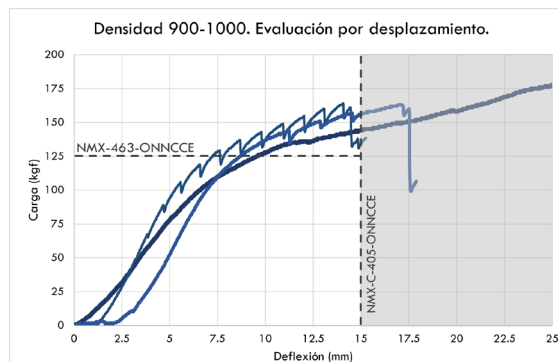


Fig 182 Colocación de pieza prefabricada y soporte en la máquina de ensayos universales para su evaluación. Fotografía del autor.

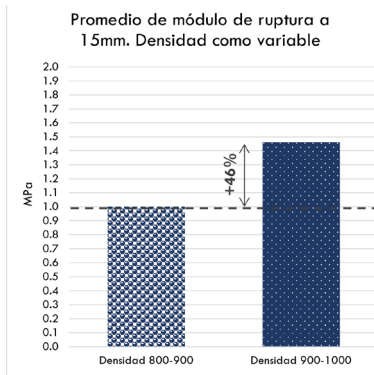
Se **evaluaron 3 piezas** utilizando la mezcla definida con las pruebas a flexión, **variando su densidad en solo 2 grupos**, producto del análisis de las variaciones en la densidad que se presentaron en las pruebas a flexión y compresión. Las piezas se nombraron de la siguiente forma: DEN8-9 PP 1,2,3 para piezas con **densidad entre los 800 y los 900kg/m³** y DEN9-10 PP 1,2,3 con **densidades entre los 900 y 1000kg/m³**. Aunque la forma de evaluación no es como el procedimiento normado, en todos los casos se **consiguió resistir los 125kgf** que solicita la norma NMX-C-463-ONNCCE, con deflexiones variables. Para el caso de las DEN8-9 apenas superaron los 125kgf, con una **deflexión promedio de 20mm**, mientras que las DEN9-10 lo hicieron apenas reportando **8mm de deflexión** promedio.



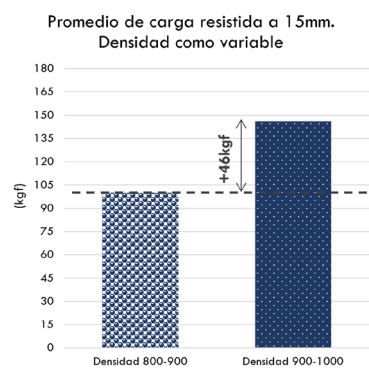
Gra 60 Gráfica carga-deflexión de la mezcla con densidad entre 800 y 900 kg/m³. Elaboración propia.



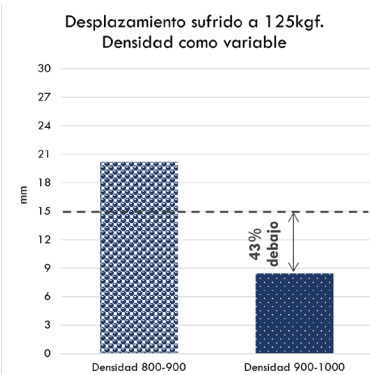
Gra 61 Gráfica carga-deflexión de las probetas con densidad entre 900-1000kg/m³. Elaboración propia.



Gra 62 Diferencia entre los módulos de ruptura por densidad. Elaboración propia.

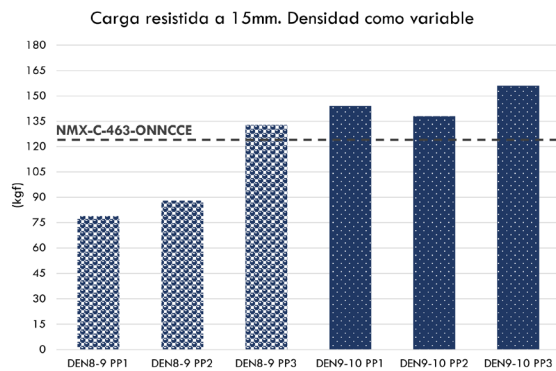


Gra 63 Gráfica de la carga resistida al variar la densidad. Elaboración propia.

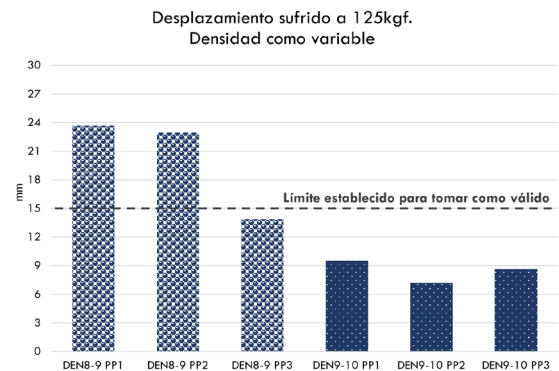


Gra 64 Deflexión ante carga de norma. Se tiene como límite 15mm. Elaboración propia.

Si se toman los 15mm de deflexión como adecuación a la norma para evaluar las piezas de pajarcilla se tendría que **solamente una pieza de las BOV8-9 resistió** por encima de los 125kgf, mientras que **las otras dos se quedaron 32% por debajo** de la carga solicitada. El caso de las **piezas DEN9-10** fue más favorable, ya que se **superó en promedio, un 16% a la carga a solicitada**, antes de los 15mm de desplazamiento. Aunado a esto, la fiabilidad de los resultados en las piezas DEN9-10 es mayor, ya que la presentada fue mucho menor que las de las DEN8-9.



Gra 65 Piezas que cumplen con la prueba. Elaboración propia.



Gra 66 Deflexión de las piezas y cumplimiento. Elaboración propia.

Aunque se priorizó la densidad menor (800kg/m^3) durante las evaluaciones a flexión, los resultados de esta serie muestran nuevamente, que **la densidad juega un papel importante** y que, para el caso de **limitar la capacidad de carga** de las piezas **sin llegar al 3% del claro**, se requiere una densidad de más de 900kg/m^3 . Se explicó que la decisión de usar la densidad 800 fue en búsqueda de piezas más ligeras y que fueran fácilmente manio-brables, pero tras la definición del diseño del sistema y de la pieza, se encontró que **pasar de la densidad 800kg/m^3 a la 1000kg/cm^3** representaba un **aumento de solo 2kg en la pieza**. Bajo estos criterios, se decidió continuar las pruebas con piezas cuya densidad estuviera entre los 900kg/m^3 .

Probetas	Densidad 800-900			Densidad 900-1000		
	DEN8-9 PP1	DEN8-9 PP2	DEN8-9 PP3	DEN9-10 PP1	DEN9-10 PP2	DEN9-10 PP3
Densidad promedio kg/m^3	738.53			975.81		
Módulo de ruptura promedio a 15mm	1.00			1.46		
Ganancia	X			0.46		Mpa
				46.00%		
Promedio de desplazamiento a 125kgf	20.18			8.45		
Diferencia	-5.18			6.55		mm
	34.51%			-43.68%		

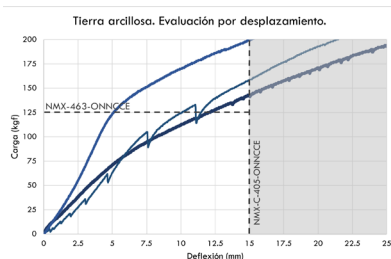
Tab 54 Tabla comparativa de las piezas prefabricadas evaluadas por desplazamiento. Serie estabilización física. Elaboración propia.

Tierra como variable

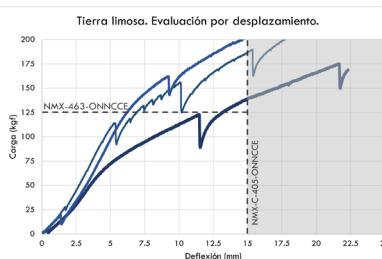
	Arcillosa			Limosa			Arenosa		
Probetas	Arc PP1	Arc PP2	Arc PP3	Lim PP1	Lim PP2	Lim PP3	Arn PP1	Arn PP2	Arn PP3
Densidad	1141.72	1018.33	1055.99	1100.05	1054.39	1081.63	1023.94	945.42	1068.01
Des. Es Densidad	63.23			22.98			62.09		
Densidad promedio kg/m ³	1072.012			1078.689			975.807		
Desplazamiento a 125kgf de carga	11.932	10.001	5.061	13.113	6.871	6.179	-	-	-
Des. Es Desplazamiento	3.54			3.82			-		
Promedio de desplazamiento a 125kgf	8.998			8.721			-		
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	167.00			176.33			63.67		
Módulo de ruptura 15mm (Mpa)	1.43	1.59	2.06	1.31	1.77	2.06	0.52	0.63	0.67
Des. Es Modulo de ruptura	0.33			0.37			0.08		
Módulo de ruptura promedio (MPa)	1.69			1.71			0.61		

Tab 55 Resultados de evaluación por desplazamiento a piezas prefabricadas. Elaboración propia.

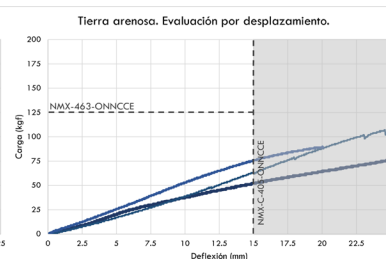
Con resultados favorables en el primer muestreo, se replicó el procedimiento de evaluación con 3 tierras distintas, nombradas de la siguiente forma: tierra arcillosa (Arc PP 1,2,3), tierra limosa (Lim PP 1,2,3) y tierra arenosa (Arn PP 1,2,3). Las tres piezas de **tierra arcillosa superaron los 125kgf sin presentar fractura y sin llegar a los 15mm de deflexión**. 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.



Gra 67 Carga-deflexión de la tierra arcillosa. Elaboración propia.

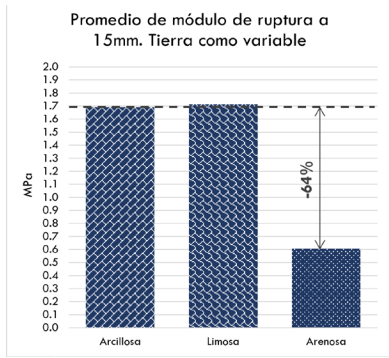


Gra 68 Carga-deflexión de las piezas con tierra limosa. Elaboración propia.

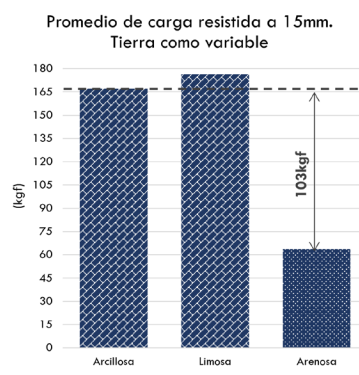


Gra 69 Carga-deflexión con tierra arenosa. Elaboración propia.

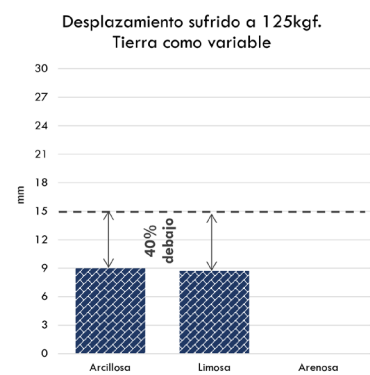
Los **resultados con la tierra limosa** no fueron muy diferentes a los de la tierra arcillosa. Todas las piezas **superaron los 125kgf sin presentar fractura y previo a los 15mm de deflexión**, presentando también el comportamiento “elástico” de las piezas con tierra arcillosa. Para el caso de las **piezas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



Gra 70 Diferencia entre los módulos de ruptura por tierra. Elaboración propia.

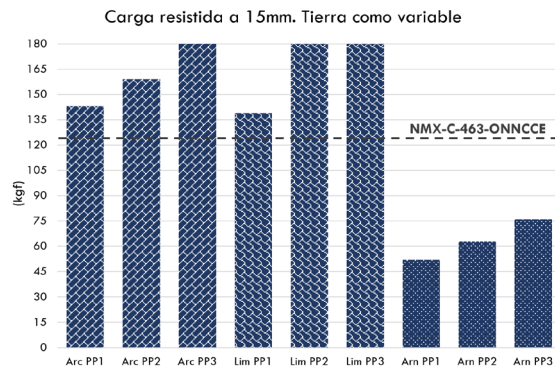


Gra 71 Gráfica de la carga resistida al variar la tierra. Elaboración propia.

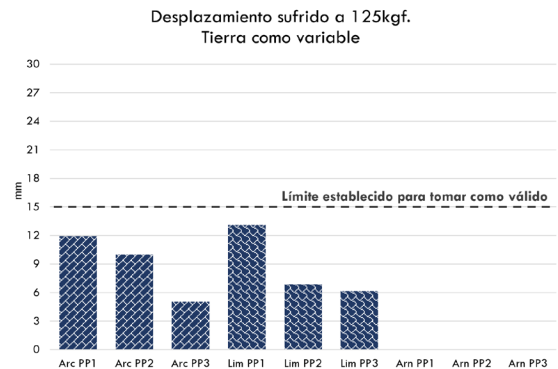


Gra 72 Deflexión ante carga de norma. Se tiene como límite 15mm. Elaboración propia.

Mientras **a los 15mm la tierra arenosa llegó solamente a la mitad de la carga solicitada**, tanto **la tierra arcillosa como la limosa superan los 125kgf por un 35%**. También se repite la similitud encontrada en las pruebas a flexión de las probetas, ya que el **módulo de ruptura de las tierras arcillosa y limosa difiere únicamente en 1.22kg/cm²**. Como dato adicional, la prueba de la tierra arenosa se dejó seguir hasta los 30mm de desplazamiento, a pesar de ello, en ninguna pieza se alcanzó la carga de 125kgf.



Gra 73 Piezas que cumplen con la prueba. Elaboración propia.



Gra 74 Deflexión de las piezas y cumplimiento. Elaboración propia.

Por la similitud de resultados entre las **tierras arcillosa y limosa**, se podría decir que, en este caso, **cualquiera de las 2 tierras cumple con el método de evaluación establecido**. En caso de encontrarse con una **tierra arenosa**, a pesar de la cantidad o cohesión que presente su arcilla, se **recomienda evitar su uso para esta técnica**, ya que, a pesar de no soportar la carga de la norma, la fabricación de las piezas con esta tierra resulta compleja. El requerir un cuidado extra en el desmoldado y manipulación de las piezas con tierra arenosa, impacta directamente en la efectividad constructiva de la propuesta.

	Arcillosa			Limosa			Arenosa		
Probetas	Arc PP1	Arc PP2	Arc PP3	Lim PP1	Lim PP2	Lim PP3	Arn PP1	Arn PP2	Arn PP3
Densidad promedio kg/m ³	1072.01			1078.69			975.81		
Módulo de ruptura promedio a 15mm	1.69			1.71			0.61		
Ganancia	X			0.02		Mpa	-1.09		Mpa
				1.15%			-64.15%		
Promedio de desplazamiento a 125kgf	9.00			8.72			-		
Diferencia	6.00		mm	6.28		mm	-		mm
	-40.01%			-41.86%			-		

Tab 56 Tabla comparativa de las piezas prefabricadas evaluadas por desplazamiento. Serie estabilización homogénea. Elaboración propia.

6.4.2 Evaluación por carga (kg/min)

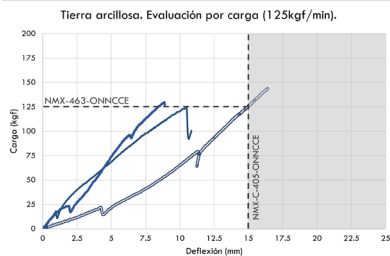
Prueba 125kg/2min y 125kg/1min

	Arcillosa			Limosa			Arenosa		
Probetas	Arc PP4*	Arc PP5	Arc PP6	Lim PP4*	Lim PP5	Lim PP6	Am PP4*	Am PP5	Am PP6
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			975.807		
Desplazamiento a 125kgf de carga	14.897	10.446	8.760	13.297	7.112	7.080	-	21.317	18.447
Des. Es Desplazamiento	3.17			3.58			2.03		
Promedio de desplazamiento a 125kgf	11.368			9.163			19.882		
Módulo de ruptura 15mm (Mpa)	0.38	0.38	0.39	0.35	0.36	0.40	0.37	0.38	0.33
Des. Es Módulo de ruptura	0.01			0.02			0.02		
Módulo de ruptura promedio (MPa)	0.38			0.37			0.36		

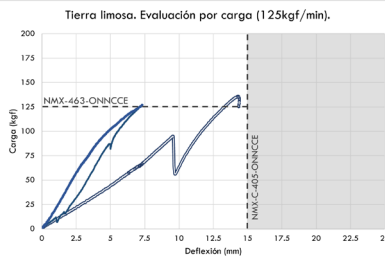
Tab 57 Resultados de evaluación por carga a piezas prefabricadas. Elaboración propia.

Al analizar la respuesta mecánica de las piezas al **aplicarle la carga en 2min**, 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** (Arc PP 4,5,6), **tierra limosa** (Lim PP 4,5,6) y **tierra arenosa** (Arn PP 4,5,6). **Todas las piezas resistieron la carga** tal cual lo establece la norma. Al aplicar la carga **en 2min**, la **deflexión 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**.

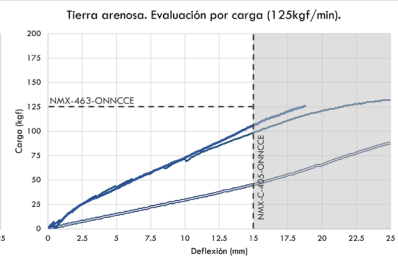
La línea sin relleno representa la prueba aplicando la carga en 2 minutos, mientras que las rellenas refieren a cuando se aplicó la carga como lo indica la norma, en 1 minuto. Todas las pruebas se detuvieron al superar los 125kgf.



Gra 75 Carga-deflexión de la tierra arcillosa, donde todas las piezas superaron los 125kgf sin llegar a los 15mm. Elaboración propia.

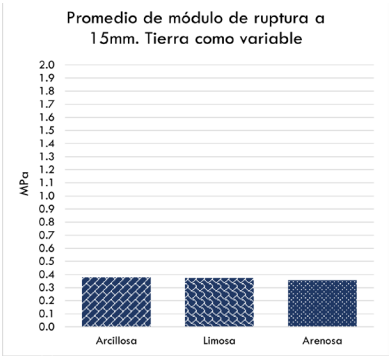


Gra 76 Carga-aplastamiento de las piezas con tierra limosa. En todos los casos se alcanzó la carga dentro de los 15mm. Elaboración propia.

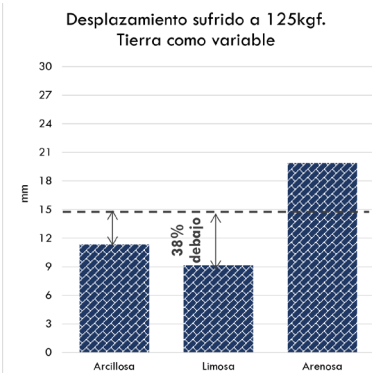


Gra 77 Carga-aplastamiento con tierra arenosa. Aunque se alcanzó la carga, esto se dio con deflexiones mayores a los 15mm. Elaboración propia.

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, por debajo de los 15mm. 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 deflexiones 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.



Gra 78 Diferencia entre los módulos de ruptura por tierra. Elaboración propia.

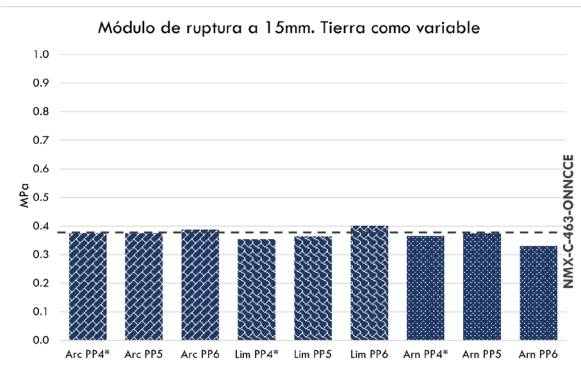


Gra 79 Deflexión ante carga de norma. Se tiene como límite 15mm. Elaboración propia.

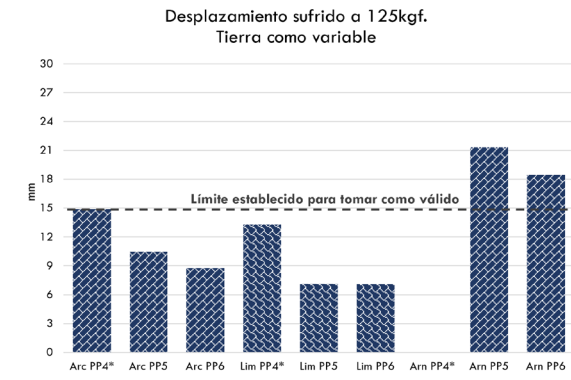


Fig 183 Colocación de pieza y soporte en para la prueba. Fotografía del autor.

Aunque las piezas de tierra arenosa no llegaron al quiebre y teóricamente pasarían la NMX-C-463-ONNCCE, para fines prácticos se decidió que si eso no se lograba antes de los 15mm no cumplía con tal, por lo que la tierra arenosa **no es apta para esta propuesta**. Nuevamente la **diferencia entre módulos de ruptura** de las tierras arcillosa y limosa difiere en muy poco (**menos de 0.10kg/cm²**), así como la deformación sufrida a los 125kgf (2mm de diferencia).



Gra 80 Piezas que cumplen con la prueba. Elaboración propia.



Gra 81 Deflexión de las piezas y cumplimiento. Elaboración propia.

El **desempeño mecánico de las piezas depende 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**. Ambas pruebas brindan información importante por lo que se recomienda realizar ambas pruebas en cada caso práctico.



Fig 184 Deflexión permanente de solo 5mm en la pieza de tierra arcillosa tras la prueba. Fotografía del autor.

Probetas	Arcillosa			Limosa			Arenosa		
	Arc PP4*	Arc PP5	Arc PP6	Lim PP4*	Lim PP5	Lim PP6	Arn PP4*	Arn PP5	Arn PP6
Densidad promedio kg/m3	1072.01			1078.69			975.81		
Módulo de ruptura promedio a 15mm	0.38			0.37			0.36		
Ganancia	X			-0.01 Mpa			-0.02 Mpa		
Promedio de desplazamiento a 125kgf	11.37			9.16			19.88		
Diferencia	3.63 mm			5.84 mm			-4.88 mm		
	-24.22%			-38.91%			32.55%		

Tab 58 Tabla comparativa de las piezas prefabricadas evaluadas por carga. Serie estabilización homogénea. Elaboración propia.

6.4.3 Evaluación del refuerzo

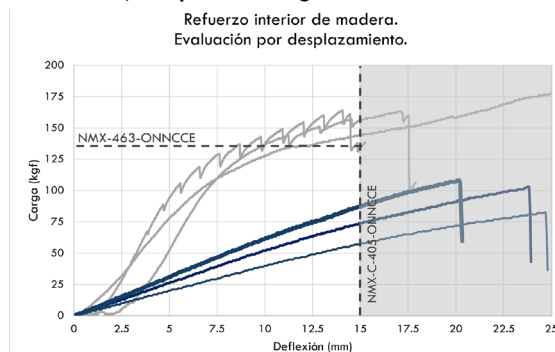
	Refuerzos interiores		
Codigo	REF-1	REF-2	REF-3
Carga máxima aplicada (kgf)	103.00	108.00	83.00
Des. Es Densidad	13.23		
Promedio de carga max aplicada (kgf)	98.000		
Deflexión ante carga máxima	23.830	20.320	24.800
Des. Es Deflexión	2.36		
Promedio de deflexión ante carga máxima	22.983		
Carga resistida 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		

Tab 59 Resultados de evaluación a refuerzos interiores. Elaboración propia.

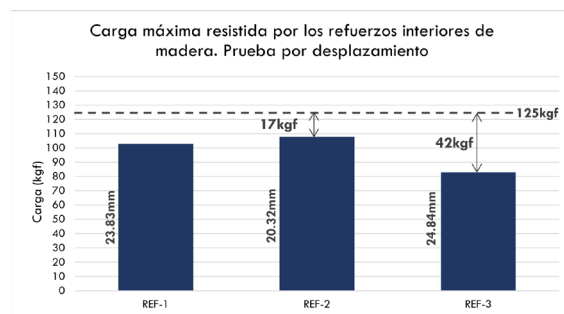


Fig 185 Prueba de refuerzos. Fotografía del autor

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 interiores de madera **lograron resistir poco más de 100kgf, la deflexión sufrida es mucho mayor** a la reportada por las piezas ante esta carga. Además, 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.



Gra 82 Gráfica carga-deflexión de la mezcla con densidad entre 800 y 900 kg/m3. Elaboración propia.



Gra 83 Gráfica carga-deflexión de la mezcla con densidad entre 800 y 900 kg/m3. Elaboración propia.

Se encontró que aun cuando los **refuerzos resisten en promedio 100+/- 15kgf**, la deflexión sufrida es mucho mayor a la reportada al estar envueltos por la pajarcilla, además de que, al trabajar en conjunto, la **pieza continúa soportando carga a pesar de quebrar el refuerzo**.

6.5 SISTEMA

6.5.1 Validación por correlación

Como se tomó de referencia la normativa que evalúa las bovedillas en el sistema convencional de construcción, se postuló **evaluar el sistema completo** de acuerdo con la norma **NMX-C-406-ONNCE** sobre métodos de prueba para los componentes de sistemas de losas de concreto prefabricadas¹⁹³. Sin embargo, esta normativa **evalúa los elementos por separado** y ya que las NTC¹⁹⁴ 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 produzcan las condiciones reales, se proponen 2 alternativas: **evaluar el sistema en conjunto o validar el entrepiso a partir de sus componentes**.

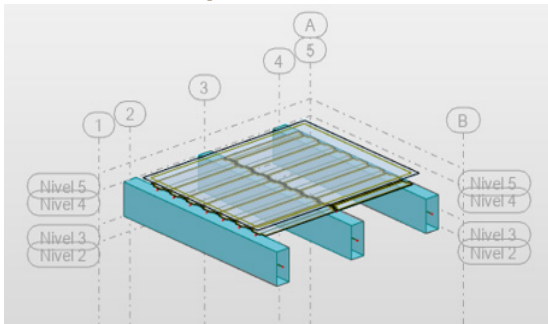


Fig 186 Modelado digital del entrepiso semi-prefabricado en el software Robot de Autodesk. Autoría propia.



Fig 187 Prueba empírica a la pieza prefabricada. Fotografía del autor.

La primera opción puede realizarse **usando algún software de simulación** alimentado de los datos obtenidos en las propias pruebas o en su defecto, realizar **pruebas empíricas o de campo**, como las observadas en los casos análogos que, aunque no se tiene una carga constante ni un registro riguroso, al fabricar un módulo de 1m2 escala 1:1 e ir sumando los pesos de las personas que se van subiendo al módulo se da una carga mayor a la combinación de cargas de las NTC, se puede decir que este cumple, además de ser el método más sencillo de replicar, es el más representativo visualmente, así como la aplicación de la carga es similar a la que estará sometido en la vida útil del sistema. Para cualquiera de los dos métodos, **se necesita calcular la combinación de carga de acuerdo con el apartado de pisos ligeros de madera de las NTC**, donde se establece la **carga viva** como una carga concentrada de **250kgf** para los elementos de soporte y **100 kgf** para la cubierta.

Ahora bien, como la norma establece que, **el método de ensayo seleccionado deberá definirse específicamente para cada caso de interés** y en caso de no tener la posibilidad de realizar una prueba del sistema a escala 1:1, se entiende que

193 Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c., Industria de la construcción - Componentes para sistemas de losas prefabricadas de concreto - Especificaciones y métodos de ensayo.

194 Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda y Secretaría de Obras y Servicios, Normas Técnicas Complementarias Sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones.

la validación del entrepiso completo se puede dar a partir de que sus componentes, y de este modo, los elementos modulares que, resistan los 125kgf solicitados por la NMX-C-463, se pueden tomar como válida su aplicación constructiva, siempre y cuando, la madera de la estructura principal también cumpla con ello.

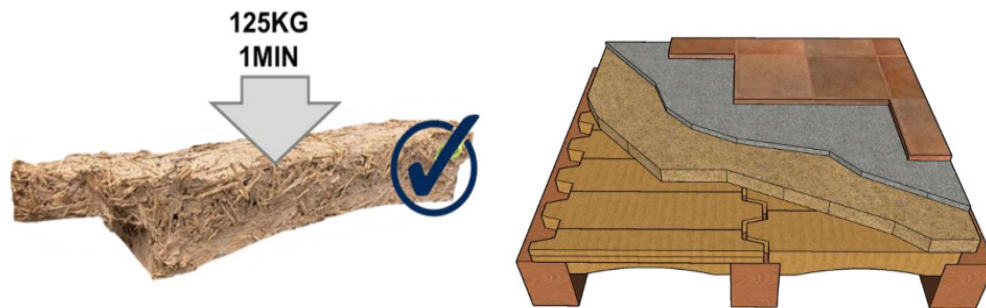


Fig 188 Validación del entrepiso por correlación de la resistencia de sus componentes. Autoría propia.

Como complemento, también se calculó la carga que deberá resistir cada pieza dentro del sistema a partir de la carga por m^2 calculada con las NTC. Como la división de la carga no sucede de esta forma y el cálculo de esta forma únicamente solicita una resistencia de 30kgf por pieza, se opta por reivindicar lo establecido en la NMX-C-463-ONNCCE.

Carga a pieza prefabricada			
C. MUERTAS			
Modulo	Largo	Ancho	Area
	1.00	1.30	1.30
	Peso (kg/m3)	Grosor (m)	Total (kg/m2)
Loseta de barro rojo recocido 30x30x2	1500.00	0.02	30.00
		1x1x0,02	1500x0,02
Mortero cal-arena 1:3	1500.00	0.02	30.00
		1x1x0,02	1500x0,02
Capa de compresión de tierra aligerada	1000.00	0.05	50.00
		1x1x0,05	980x0,05
CM TOTAL			110.00
C. VIVAS			
	W	Wa	Wm
Casa Hab.	80	100	190.00
Pisos ligeros (soporte)			250.00
Pisos ligeros (cubierta)			100.00
A usar			100.00

Tab 60 Cálculo de la resistencia que debe cumplir la pieza por repartición de cargas Elaboración propia.

C.SERVICIO			
=Carga Muerta+Carga Viva			
210.00 kg/m2			
Factores de carga			
Permanentes	1.3	110.00	143.00
Variables	1.5	100.00	150.00
Resistencia			293.00
Peso a resistir por pieza			
Reparto de peso			
kg/modulo	1.3	293.00	380.90
No. De piezas			14
Resistencia			27.21

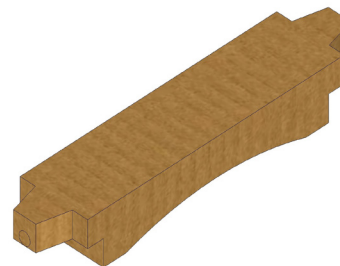


Fig 189 Pieza prefabricada para vigas de 15x20cm. Fotografía del autor.

Se recalca que de esta forma se estarían validando las partes del sistema y que la forma de validar el sistema en conjunto será la fabricación a escala real. Sin embargo, lo que se busca con este método es dotar de mayor seguridad previo a la ejecución de la prueba 1:1 o la construcción de este.

6.5.2 Aplicación constructiva

La propuesta se llevó a la práctica, con la finalidad de despejar dudas sobre la aplicación constructiva, así como **determinar si con la prefabricación se cumple con los postulados que dieron origen a la investigación**. El Proyecto San Isidro, lugar de donde se obtuvo la tierra arcillosa, prestó el espacio, herramientas y materiales para llevar a cabo esta experimentación. Se proyectó colocar el entrepiso semi-prefabricado en una **sección de 1.75x2.00m**, que forma parte de una obra en proceso en el centro de enseñanza.

Para elaborar las piezas prefabricadas se le realizaron algunas **modificaciones al molde original**, esto con el objetivo de eficientar el proceso al omitir los pasos de armado y desarmado del molde. Como la distribución de las vigas se hizo con base en las medidas del área a cubrir, se tuvieron **separaciones entre vigas de 43cm en los extremos y 52cm en el claro central**. En total se elaboraron **33 piezas completas y 2 mitades**, con las proporciones y procedimientos establecidos en las pruebas realizadas.

La parte inicial de la experimentación se desarrolló dentro del curso de Inmersión en la Bioconstrucción **a modo de taller**, para mostrarle la propuesta a los asistentes y recabar información con relación a la comparación con el método tradicional, que habían aprendido en días anteriores. Las opiniones con respecto a **la reducción del desgaste energético de la propuesta semi-prefabricada** eran favorables, ya que al poder hacerlo en de pie y en una mesa resultaba más cómodo y fácil, que hacerlo de rodillas.

Si bien la información anterior pueda carecer de un aspecto cuantitativo al ser meramente cualitativa o de percepción, al comparar el **rendimiento por m² de la cuadrilla 1-1** para fabricar **el entrepiso tradicional** (0.3m²/hora) resultó **similar al de 1 persona con un molde** (5 pzas/hora o bien 0.375m²). Aunque en el método tradicional ese rendimiento ya incluye la colocación, a la propuesta semi-prefabricada se le debe agregar ese tiempo. Para colocar las 34 piezas



Fig 190 Molde original. Fotografía del autor.



Fig 191 Molde modificado con apoyo del maestro carpintero Adrián Flores Hernández. Fotografía del autor.



Fig 192 Revoltura de la pajarcilla para la mitad de las piezas. Fotografía del autor.



Fig 193 Fabricación de piezas en campo. Fotografía del autor.

sobre las vigas ya niveladas, **1 persona tarda alrededor de 1 hora**, mismo tiempo en el que con el método tradicional se podría avanzar 0.09m^2 .

Con esa información se podría concluir que los **rendimientos son idénticos ($0.380\text{m}^2/\text{hora}$ en ambos casos)**, pero la diferencia radica en que en la propuesta de prefabricación pueden trabajar **varias personas al mismo tiempo**, lo que elevaría el rendimiento de acuerdo con la **cantidad de moldes y personas**. Otra ventaja que se encontró fue que, al ser un prefabricado, se puede **avanzar en el entrepiso mientras se llevan otras actividades simultáneas**, lo que impacta en los tiempos de toda la obra y por tanto en su costo.



Fig 194 Almacenaje y secado de las piezas.
Fotografía del autor.



Fig 195 Colocación de piezas prefabricadas sobre viguetas de madera.
Fotografía del autor.



Fig 196 Vista superior de entrepiso semi-prefabricado de pajarcilla.
Fotografía del autor.



Fig 197 Vista inferior/interior del espacio cubierto por la propuesta.
Fotografía del autor.



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Caracterización de tierras

Identificar un suelo es encasillarlo dentro de un sistema previo y aunque esto sea de gran ayuda para conocer de forma cualitativa sus características mecánicas e hidráulicas, la experiencia en estos procedimientos juega un papel importante. Se recalca que **esta clasificación y por tanto las pruebas que conlleva**, nacieron enfocadas a **analizar al suelo donde se desplantará** alguna obra civil por lo que se pretende **estudiarlo tal cual** se encuentra en estado natural, mientras que **la tierra para construcción si sufre procesos de alteración** tales como el cribado, mezcla y compactación. Es por tanto importante entender que si bien, se tomó como base científica el análisis de suelos en laboratorio, **resulta complejo extrapolar dichos resultados a la práctica constructiva**.

7.2 Evaluación de la pajarcilla a flexión

Las **pruebas mecánicas aplicadas a la pajarcilla** revelan los factores que influyen en la resistencia a flexión de esta mezcla. La **variable** que emergió como **determinante en este estudio fue la longitud de la fibra**, evidenciando un aumento notorio del 53% en resistencia al optar **exclusivamente por fibras largas (10 a 15 cm)**, en comparación con fibras cortas (menores a 5 cm). Además, se observó un incremento del 32.06% al combinar fibras largas y cortas en la mezcla, lo que sugiere la importancia de la longitud de la fibra en la mejora de las propiedades mecánicas.

En cuanto a la **densidad, se registró un aumento del 32%** en la resistencia al flexionar las probetas cuando la densidad pasó de 800 kg/m^3 a 1000 kg/m^3 . La **forma de compactación** también demostró ser un factor clave, ya que, aunque la compactación con prensa no afectó significativamente la resistencia a la flexión, **contribuyó a reducir la desviación estándar de la densidad**, señalando la importancia de la uniformidad en el proceso de fabricación.

Las pruebas con distintos agregados estabilizantes indicaron que la mezcla presenta un **mejor desempeño mecánico a flexión cuando se compone únicamente de los elementos principales**: agua, tierra y paja. Este hallazgo sugiere que la simplicidad en la composición puede ser clave para optimizar las propiedades mecánicas de la tierra aligerada.

7.3 Evaluación de la pajarcilla a compresión

La **mayor resistencia se logra con la mezcla de densidad alta**, con un promedio de 990 kg/m^3 y agregar **mucílago de nopal** en la pajarcilla aporta un **aumento de cerca del 80 %**, por lo que resulta de interés su estudio a futuro. Aunque

en las técnicas más utilizadas para muros, se han reportado resistencias de hasta 90 kg/cm² con tierra arenosa, en este caso, al **estar mezclada con fibras**, el mejor desempeño se logró **utilizando tierra arcillosa o limosa**.

Se demostró que **la prueba, análisis y modificación de los componentes ayudan a aumentar la resistencia de la pajarcilla**. Como la tierra no es un material estandarizado, se deberá entender que cada caso será único, por lo que la evaluación particular de la pajarcilla se vuelve vital.

7.4 Evaluación de la pieza prefabricada

Como la NMX-C-463 pide aplicar una carga concentrada de 125 kg en un minuto sin presentar falla por corte o flexión, al hacer las pruebas a flexión de las probetas se podría tener un indicio de la futura aprobación por norma del elemento o no. Si bien no es escalable y en cada caso será distinto, **se propone que desde la evaluación de las probetas a flexión se puede tener un indicio de que mezclas cumplirán con la norma**, una vez sea implementada en la pieza prefabricada. De forma aproximada y sin tomar esto como un parámetro de cumplimiento, se encontró **que resistiendo los 30kg en las probetas a flexión**, se incrementa la posibilidad de cumplir con lo solicitado para las piezas prefabricadas. Así como en la evaluación a flexión, se valida a partir del promedio de mínimo de 3 piezas.

Los **resultados se ven favorecidos** cuando la **aplicación de la carga se realiza de forma rápida**, tal como lo indica la norma (125kgf/1min), pero al transmitir este método a la forma en la que estarán siendo sometidas las piezas en su vida útil, se puede decir que **algunas zonas recibirán cargas durante un periodo largo** de tiempo, mientras que **otras, estarán sometidas a impactos o cargas espontáneas**, por lo que se recomienda **realizar tanto la prueba por desplazamiento** a fin de conocer la deformación y ductilidad de la pieza, así **como la prueba por aplicación de carga** en 1 min para cumplir con lo solicitado por norma.

7.5 Evaluación del sistema

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**.

7.6 Generales

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.**

Las similitudes que presentan **las tierras arcillosa y limosa** se ven reflejadas desde la caracterización de estas, en las pruebas a flexión y compresión de la pajarcilla y nuevamente en la evaluación de las piezas prefabricadas. Como el criterio de **diferencia entre estas dos tierras se dio a partir de la cantidad de arcilla** o limo de cada una en la prueba de **sedimentación**, para definir que tierra usar en las piezas prefabricadas de pajarcilla se puede **enfocar la atención en la prueba de cohesividad**, cuyos resultados tienen una **respuesta directa con la construcción con tierra** y donde la diferencia entre estas tierras fue de menos de 1 cm promedio.

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-ON-NCCE 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, por los resultados mostrados entre la **definida como limosa o arcillosa, se puede establecer que más allá de denominar tierra limosa o arcillosa, se deberá establecer** bajo que resultados o criterios de las pruebas de caracterización, **una tierra es apta o no para esta técnica**, lo que se puede definir a partir de las **pruebas donde ambas tierras tuvieron similitud.**

A partir de los resultados obtenidos en los métodos de prueba elaborados se puede concluir lo siguiente:

- a. No se requiere una norma que determine las resistencias que debe cumplir la pajarcilla, pero si **se requiere evaluarla como cualquier material de construcción.**
- b. **Los criterios y métodos de evaluación para otros materiales** terminan no siendo los más adecuados, por lo que **requieren modificarse** para ser aplicados en la construcción con tierra.
- c. Para esto se deben **entender las diferentes técnicas de construcción** con tierra y por tanto **proponer diferentes procesos de evaluación** según el sistema constructivo y requerimientos mecánicos.
- d. Los procesos de evaluación de las técnicas de construcción con tierra deberán **iniciar por el análisis de la tierra y conocer su interacción con los demás componentes.**
- e. Se debe entender 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 pajarcilla se vuelve vital.**

Por último, después de **135 pruebas para caracterización de tierra, 58 pruebas a flexión y 27 a compresión**, así como **24 evaluaciones a las piezas prefabricadas** y la **construcción de 3.5m²** de entrepiso escala 1:1, **se afirma** que la propuesta del **entrepiso semi-prefabricado de pajarcilla cumple con las solicitudes estructurales establecidas en la normativa mexicana** y por tanto puede ser implementado en la construcción contemporánea a pesar de su omisión en los reglamentos de construcción.



Fig 198 Construcción a escala real del entrepiso semi-prefabricado de pajarcilla.
Fotografía del autor.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Interior de estructura piramidal en la Venta, Tabasco. Tomado de Drucker, 1952. **página 12.**
- Figura 2.** Interior de estructura prehispánica. Tomado de Drucker, 1952. **página 12.**
- Figura 3.** Sahkalli o jacal con techo de zacate. Tomado de “Arquitectura en el código Florentino” de Rodríguez A. y Valillas L. s/f. **página 13.**
- Figura 4.** Pochtekakalli o casa de comerciantes. Tomado de Rodríguez A. y Valillas L. s/f. **página 13.**
- Figura 5.** Tlallankalli o casa entre la tierra. Tomado de Rodríguez A. y Valillas L. s/f. **página 13.**
- Figura 6.** Santuario de muros de adobe en San Pablo Villa de Mitla. Fotografía del autor. **página 13.**
- Figura 7.** Tapia francesa adaptada y usada en México. Tomado de Hernández, 2002. **página 13.**
- Figura 8.** Barda de predio hecha con adobe en Atltzayanca, Fotografía del autor. **página 14.**
- Figura 9.** Interior de muro de adobe recubierto de piedra en Puebla. Fotografía del autor. **página 14.**
- Figura 10.** Barda de adobe con contrafuerte de tabique en Patzcuaro. Fotografía del autor. **página 14.**
- Figura 11.** Casa de adobe en Tlaxco. Fotografía del autor. **página 15.**
- Figura 12.** Vivienda de 2 niveles hecha de adobe con recubrimiento de cal-arena en Morelia. Fotografía del autor. **página 15.**
- Figura 13.** Casa de adobe en San Pablo Villa de Mitla. Fotografía del autor. **página 15.**
- Figura 14.** Daños en viviendas de tierra tras el sismo del 2017. Se observan intervenciones y losas de concreto. Tomado de Zatarain, 2017. Fotografía de Onnis Luque. **página 16.**
- Figura 15.** Desprendimientos de recubrimientos de cemento y daños en muros de adobe. Tomado de Sánchez, 2021. Fotografía de Sánchez, 2018. **página 16.**
- Figura 16,17.** Diagrama constructivo de pajarcilla en muro y pajarcilla en entrepiso. Tomado del manual “Notas sobre bioconstrucción” de Caballero, 2021. **página 17.**
- Figura 18.** Proceso constructivo del entrepiso de pajarcilla tradicional. Fotografías tomadas por el autor en Proyecto San Isidro. **página 18.**
- Figura 19.** Pruebas a flexión y compresión en adobes con paja y acerrín. Tomado de Costi, Ioannou y Philokyprou, 2021. **página 19.**
- Figura 20.** Esquema para pruebas de impacto a flexión y compresión. Tomado de Aymerich, Fenu, Francesconi et al. 2016. **página 19.**
- Figura 21.** Pruebas a compresión y flexión de tierra aligerada. Tomado de Giarreton, Dizhur y Morriset, 2021. **página 19.**
- Figura 22.** Leichtlehbau en Alemania. Volhard, 2016. **página 24.**
- Figura 23.** Terre Allégée en Francia. Fotografía del autor. **página 24.**
- Figura 24.** Adobillo en Chile. Adobe patrimonial, 2020. **página 24.**
- Figura 25.** Pajarcilla en México. Fotografía del autor. **página 24.**
- Figura 26.** Soluciones de apoyos entre refuerzos y viguetas de madera para entrepisos o cubiertas de tierra aligerada. a), c), d) tomado de Volhard, 2016. b) autoría propia. **página 25.**
- Figura 27.** Cortes constructivos de la técnica original. Tomado de Volhard, 2016. Edición propia. **página 25.**
- Figura 28.** Cortes constructivos de la técnica de los rollos. Tomado de Volhard, 2016. Edición propia. **página 26.**
- Figura 29.** Cortes constructivos de entrepiso con cimbras móviles. Tomado de Volhard, 2016. Edición propia. **página 26.**
- Figura 30.** Posición del trabajador durante la construcción del entrepiso o cubierta de pajarcilla. Izquierda: postura durante el compactado desde la parte superior. Derecha: aplicación de acabados o presión de la mezcla en el piso de listones. **página 27.**

Figura 31. Cortes constructivos de piso de listones. Tomado de Volhard, 2016. Edición propia. **página 27.**

Figura 32. Distintos moldes de acuerdo al material y especificaciones de la pieza. Autoría propia a partir de Volhard 2016. Edición propia. **página 28.**

Figura 33. Molde de madera para piezas curvas. Tomado de Volhard, 2016. **página 28.**

Figura 34. Prensa desmontable de madera para piezas de pajarcilla. Tomado de Pereyra Gigogne 2003. **página 28.**

Figura 35. Diagrama de tierra como estructura. Autoría propia a partir de ONU Hábitat 1992. **página 29.**

Figura 36. Diagrama de tierra como superficie. Autoría propia a partir de ONU Hábitat 1992. **página 29.**

Figura 37. Diagrama de tierra como relleno en seco. Autoría propia a partir de ONU Hábitat 1992. **página 30.**

Figura 38. Diagrama de tierra como relleno con fibras. Autoría propia a partir de ONU Hábitat 1992. **página 30.**

Figura 39. Diagrama de tierra en prefabricados. Autoría propia a partir de ONU Hábitat 1992. **página 30.**

Figura 40. Diagrama de terrados. Autoría propia. **página 30.**

Figura 41. Piezas de adobillo. Fotografías de Adobe patrimonial, 2020. Edición propia. **página 31.**

Figura 42. Diagrama constructivo de tabique-adobillo. Tomado de Dávila y Contreras, 2022. **página 31.**

Figura 43. Piezas de machimbloque y colocación en obra. Fotografías de Comunal Taller, 2020. Edición propia. **página 32.**

Figura 44. Diagrama de ensamble de machimbloque. Tomado de Comunal Taller, 2020. **página 32.**

Figura 45. Pieza bloque 400 y aplicación en cubierta. Fotografías de Auroville Earth Institute, 2022. Edición propia **página 33.**

Figura 46. Prensa utilizada en Auroville Earth Institute para fabricar distintas piezas. Tomado de Comunal Taller, 2022. **página 33.**

Figura 47. Elementos prefabricados de tapial. Fotografías de Tectonica, s/f y Cázares y Gustamante, s/f. Edición propia. **página 34.**

Figura 48. Almacenaje de tapias prefabricados. Tomado de Cázares y Gustamante, s/f. **página 34.**

Figura 49. Swallow brick y su colocación en obra. Fotografías de Swallow brick, 2022. Edición propia. **página 34.**

Figura 50. Almacenaje y acomodo para venta del Swallow brick Tomado de Swallow brick, 2022. **página 34.**

Figura 51. Fabricación del Domotej en obra. Tomado de Castañeda Nolasco, 2022. **página 35.**

Figura 52. Presentación de Domotej y colocación sobre vigas metálicas. Fotografías de Castañeda Nolasco, 2022. Edición propia **página 35.**

Figura 53. Preparación del sugarcrete para evaluación por peso. Tomado de Gutiérrez et al, 2022. **página 36.**

Figura 54. Piezas de sugarcrete y su ensamble visto en planta. Fotografías de Gutiérrez, et al 2022. Edición propia. **página 36.**

Figura 55. Vaciado de los componentes en un recipiente. Fotografía del autor **página 38.**

Figura 56. Prueba de viscosidad de la barbotina. Fotografía del autor. **página 38.**

Figura 57. Consistencia adecuada para su uso en pajarcilla. Fotografía del autor. **página 38.**

Figura 58. Revoltura de la barbotina con ayuda de un mezclador de pintura o de forma manual con un palo de madera. Fotografías del autor. **página 39.**

Figura 59. Componentes de la pajarcilla: paja de trigo previamente empacada y tierra arcillosa. Fotografías del autor. **página 39.**

Figura 60. Colocación por capas de paja y barbotina para hacer la pajarcilla y mezclado con biello. Fotografías del autor **página 40.**

Figura 61. 3 propuesta para piezas de entrepiso semi-prefabricado. Elaboración propia. **página 41.**

Figura 62. Técnicas masivas: Detalle de muro de adobe, inicio de muro de tapial y construcción de tierra apisonada que carga una losa catalana. Obras en Proyecto San Isidro. Fotografías del autor **página 42.**

Figura 63. Entramados: Maqueta de muro de bajareque, detalle de entrepiso de pajarcilla con acabado de yeso y cubierta de madera. Estructura de madera con muros de relleno. Obras en Proyecto San Isidro. Fotografías del autor. **página 42.**

Figura 64. Soluciones para la transmisión de carga del entrepiso hacia los elementos verticales. Del lado izquierdo se apoya directamente al muro y del lado derecho los soportes a lado de muro o en estructuras adosadas. Tomado de ONU Hábitat, 1992. **página 43.**

Figura 65. Armado de viga collar de madera previo a su colocación. Fotografías del autor. **página 43.**

Figura 66. Viga curva sobre muro curvo. Fotografías del autor **página 43.**

Figura 67. Ensamble en esquina de muros. Fotografías del autor. **página 43.**

Figura 68. Estructura recíproca de madera que funciona como diafragma. Fotografías del autor. **página 44.**

Figura 69, 70. Viga collar sobre muros y vanos que mantiene unidas las esquinas portantes de tierra apisonada. Entrepiso de pajarcilla como desplante del siguiente nivel. Obras en Proyecto San Isidro. Fotografías del autor. **página 44.**

Figura 71. Cadena de madera que recibe viguetas para entrepiso de pajarcilla. Fotografía del autor. **página 47.**

Figura 72. Interacción de la estructura de madera con la pajarcilla en muro y entrepiso. Fotografía del autor. **página 47.**

Figura 73. Vista inferior del entrepiso de pajarcilla. Fotografía del autor. **página 47.**

Figura 74. Suelo en agricultura. Fotografía del autor. **página 49.**

Figura 75. Suelo para desplante de construcción en ingeniería. Fotografía del autor. **página 49.**

Figura 76. Suelo erosionado en edafología. Fotografía del autor. **página 49.**

Figura 77. Diferencias entre suelo y tierra. Muro de adobe sobre suelo seco. Fotografía del autor. **página 50.**

Figura 78. Construcción de adobe sobre cimientos de piedra asentado sobre el suelo del terreno. Fotografía del autor. **página 50.**

Figura 79. Barda y contrafuertes de tapial para propiciar un mejor apoyo en el suelo. Fotografía del autor. **página 50.**

Figura 80. Tierra para edificar casas, tesontali. Tomado de “Arquitectura en el código Florentino” de Rodríguez A. y Valillas L. s/f. **página 52.**

Figura 81. Tierra para tapancos, tlapantlalli. Tomado de Rodríguez A. y Valillas L. s/f. **página 52.**

Figura 82. Tierra blanca para adobes, atisatl. Tomado de Rodríguez A. y Valillas L. s/f. **página 52.**

Figura 83. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Elaboración propia a partir de FAO s/f **página 52.**

Figura 84. Diagrama de características buscadas a apartir del tipo de estabilización. Elaboración propia. **página 54.**

Figura 85. Pasta de cal utilizada en la experimentación. Fotografía del autor. **página 55.**

Figura 86. Revoltura de la pasta de cal, tratando de omitir el agua superficial. Fotografía del autor. **página 55.**

Figura 87. Corte de la penca de nopal para la extracción de mucilago. Fotografía del autor. **página 56.**

Figura 88. Extracción “en seco” del mucilago de nopal. Fotografía del autor. **página 56.**

- Figura 89.** Prueba en campo del hourdi block 400. Tomado de Auroville Earth Intitute, 2022. **página 58.**
- Figura 90.** Prueba en laboratorio del Domotej. Tomado de Castañeda Nolasco. **página 58.**
- Figura 91.** Evaluación empírica del sugarcrete. Tomado de Gutiérrez et al. 2022. **página 58.**
- Figura 92.** Método de evaluación-validación del entrepiso semi-prefabricado de pajarcilla dividido en 5 etapas. **página 59.**
- Figura 93.** Equipos, herramientas e instrumentos utilizados en la caracterización de la tierra. Fotografía del autor. **página 61.**
- Figura 94.** Muestra de tierra. Fotografía del autor. **página 61.**
- Figura 95.** Tierra sin cribar. Fotografía del autor. **página 61.**
- Figura 96.** Tierra seca. Fotografía del autor. **página 61.**
- Figura 97.** Carta de plasticidad utilizada en el Sistema original. Elaboración propia a partir de Juarez y Rico, 2005. **página 62.**
- Figura 98.** Consistencia en seco. Fotografía del auto **página 63.**
- Figura 99.** Prueba del corte de esfera. Fotorgrafía del autor. **página 63.**
- Figura 100.** Prueba de sacudimiento. Fotorgrafía del autor. **página 63.**
- Figura 101.** Bola-rollo-bola. Fotografía del autor. **página 63.**
- Figura 102.** Tamizado en laboratorio. Fotografía del autor. **página 64.**
- Figura 103.** Tamizado en campo. Fotografía del autor. **página 64.**
- Figura 104.** Sedimentación en laboratorio. Fotografía del autor. **página 64.**
- Figura 105.** Sedimentación en campo. Fotografía del autor. **página 64.**
- Figura 106.** Materiales utilizados. Prueba de límite plástico. Copa de Casagrande para obtener límite líquido. Fotografías del autor **página 65.**
- Figura 107.** Materiales utilizados. Prueba de límite plástico. Alternativa didáctica del LMSE para obtener límite líquido. Fotografías del auto **página 65.**
- Figura 108.** Prueba prismática de contracción. Fotografía del autor **página 66.**
- Figura 109.** Prueba cuadrada de contracción. Fotografía del autor. **página 66.**
- Figura 110.** Prueba 8. Tomado de Volhard, 2016. **página 66.**
- Figura 111.** Ejecución de prueba de cohesividad. Fotografía del autor. **página 67.**
- Figura 112.** Resultados de prueba de cohesividad. Fotografía del autor. **página 67.**
- Figura 113.** Elaboración de mezcla por densidad. Fotografía del autor. **página 68.**
- Figura 114.** Preparación de los componentes. Fotografía del autor. **página 68.**
- Figura 115.** Resultado de probetas por densidad. Fotografía del autor. **página 68.**
- Figura 116.** Compresión de las probetas en prensa hidráulica. Fotografía del autor. **página 68.**
- Figura 117.** Estabilización mecánica a flexión. Elaboración propia. **página 69.**
- Figura 118.** Estabilización física a flexión, compresión y pieza. Elaboración propia. **página 69.**
- Figura 119.** Estabilización por armazón a flexión. Elaboración propia **página 69.**
- Figura 120.** Estabilización química a flexión y compresión. Elaboración propia **página 70.**
- Figura 121.** Estabilización homogénea a flexión, compresión y pieza. Elaboración propia. **página 71.**
- Figura 122.** Cantidad mínima de probetas por evaluación, molde fabricado para las probetas a flexión y diagrama de prueba. Elaboración propia **página 71.**
- Figura 123.** Cantidad mínima de probetas por evaluación, molde fabricado para las probetas a compresión y diagrama de prueba. Elaboración propia. **página 72.**

Figura 124. Diagrama de entrepiso de pajarcilla tradicional. Tomado de Caballero Cervates y Guerrero Baca, 2021. Edición propia. **página 73.**

Figura 125. Cantidad mínima de piezas por evaluación, molde fabricado para las propuesta de piezas y diagrama de prueba. Elaboración propia. **página 74.**

Figura 126. Soporte para evaluación de piezas prefabricadas. Elaboración propia. **página 75.**

Figura 127. Diagrama de fundamento teórico de la repartición de carga por la forma curva al inferior. Elaboración propia **página 75.**

Figura 128. Diagrama de entrepiso semi-prefabricado de pajarcilla. Elaboración propia. **página 77.**

Figura 129. Prueba de corte de esfera donde se observa lo arcilloso de la tierra por la adherencia a la mano. Fotografía del autor **página 80.**

Figura 130. Prueba de corte de esfera donde la tierra no se queda pegada a la mano ni al hacer el corte. Fotografía del autor. **página 80.**

Figura 131. Prueba de corte de esfera. Aunque se ve una tierra arenosa, esta se queda pegada a la mano. Fotografía del autor. **página 81.**

Figura 132. Mallas de tamizadora con las masas retenidas de la tierra de Tlaxco, Tlaxcala, posterior a la evaluación de tamizado en laboratorio. Fotografía del autor. **página 82.**

Figura 133. Mallas de tamizadora posterior a la evaluación de la tierra de Tlayacapan, Morelos. Fotografía del autor. **página 82.**

Figura 134. Material retenido por las mallas de la tamizadora despues de la prueba de composición en laboratorio. Fotografía del autor **página 83.**

Figura 135. Porcentajes de la prueba en el gráfico indican que es una tierra arcillosa. Elaboración propia. **página 84.**

Figura 136. El gráfico clasifica la tierra como franco areno-arcillosa. Elaboración propia. **página 84.**

Figura 137. Por los porcentajes y el gráfico, se clasifica esta tierra como arenosa. Elaboración propia. **página 84.**

Figura 138. Prueba del límite plástico lograda. Fotografía del autor. **página 85.**

Figura 139. Copa de Casagrande para límite líquido. Fotografía del autor **página 85.**

Figura 140. Carta de plasticidad que indica una tierra arcillosa de baja plasticidad. Elaboración propia. **página 85.**

Figura 141. Carta de plasticidad que coincide con los resultados de laboratorio. Elaboración propia. **página 85.**

Figura 142. Prueba equivalente a la Copa de Casagrande. Fotografía del autor. **página 85.**

Figura 143. Prueba del límite plástico tras 2 rollos de 3mm. Fotografía del autor. **página 85.**

Figura 144. Prueba del límite plástico. Fotografía del autor. **página 86.**

Figura 145. Copa de Casagrande para límite líquido. Fotografía del autor. **página 86.**

Figura 146. Carta de plasticidad que indica una tierra limosa de baja plasticidad. Elaboración propia **página 86.**

Figura 147. Carta de plasticidad que coincide en el resultado con la prueba de laboratorio, a pesar de tener datos distintos. Elaboración propia. **página 86.**

Figura 148. Llenado del tubo para obtener límite líquido. Fotografía del autor. **página 86.**

Figura 149. Prueba del límite plástico tras 3 rollos de 3mm por 10cm de longitud. Fotografía del autor. **página 86.**

Figura 150. Prueba del límite plástico no lograda, llegando a 7mm de espesor. Fotografía del autor. **página 87.**

Figura 151. Copa de Casagrande para límite líquido. Fotografía del autor. **página 87.**

Figura 152. Restos de la prueba de límite plástico.

- Disgregación de la tierra al perde humedad. Fotografía del autor. **página 87.**
- Figura 153.** Prueba de LMSE para límite líquido. Fotografía del autor. **página 87.**
- Figura 154.** Contracción con tierra de Tlaxco. Fotografía del autor. **página 87.**
- Figura 155.** Contracción tierra Tlayacapan. Fotografía del autor. **página 87.**
- Figura 156.** Contracción muestra de Atltzayanca. Fotografía del autor. **página 87.**
- Figura 157.** Compactación con prensa hidráulica. Fotografía del autor **página 91.**
- Figura 158.** Piezas posterior a la evaluación. Fotografía del autor **página 93.**
- Figura 159.** Pieza fallada. Fotografía del autor. **página 93.**
- Figura 160.** Piezas evaluadas de la serie física y mecánica. Fotografía del autor. **página 94.**
- Figura 161.** Pieza durante evaluación. Fotografía del autor. **página 94.**
- Figura 162.** Probetas de la serie por armazón. Fotografía del autor. **página 95.**
- Figura 163.** Deflexión de piezas despues de la evaluación. Fotografía del autor. **página 95.**
- Figura 164.** Inicio de prueba a flexión. Fotografía del autor. **página 95.**
- Figura 165.** Piezas posterior a evaluación. Fotografía del autor. **página 96.**
- Figura 166.** Deflexión de 5mm en la probeta. Fotografía del autor. **página 96.**
- Figura 167.** Preparación de agregados estabilizantes. Fotografía del autor **página 97.**
- Figura 168.** Secado de probetas de la serie. Fotografía del autor. **página 97.**
- Figura 169.** Probeta de pasta de cal donde se observa la ruptura en diagonal despues de la prueba. Fotografía del autor. **página 98.**
- Figura 170.** Prueba de la mezcla con mucílago de nopal. Fotografía del autor. **página 99.**
- Figura 171.** Elaboración de las probetas con tierra arcillosa. Fotografía del autor. **página 99.**
- Figura 172.** Secado de probetas. Arcillosas, limosas y arenosas. Fotografía del autor **página 100.**
- Figura 173.** Prueba de tierra arenosa sin cribar. Fotografía del autor **página 101.**
- Figura 174.** Piezas de evaluación a compresión por densidad. Fotografía del autor **página 102.**
- Figura 175.** Prueba a compresión. Fotografía del autor. **página 104.**
- Figura 176.** Secado de piezas para evaluación a compresión por estabilizante químico. Fotografía del autor. **página 104.**
- Figura 177.** Probetas con 15% de mucílago de nopal, posterior a la prueba. Fotografía del autor. **página 104.**
- Figura 178.** Probetas con 20% de pasta de cal y 15% de mucílago de nopal, después de la evaluación. Fotografía del autor. **página 105.**
- Figura 179.** Prueba a compresión de mezcla sin estabilizante. Fotografía del autor. **página 106.**
- Figura 180.** Secado de probetas a compresión con distintas tierras. Fotografía del autor. **página 106.**
- Figura 181.** Prueba a compresión de tierra arenosa. Fotografía del autor. **página 107.**
- Figura 182.** Colocación de pieza prefabricada y soporte en la máquina de ensayos universales para su evaluación. Fotografía del autor. **página 109.**
- Figura 183.** Colocación de pieza y soporte en para la prueba. Fotografía del autor. **página 114.**
- Figura 184.** Deflexión permanente de solo 5mm en la pieza de tierra arcillosa tras la prueba. Fotografía del autor **página 114.**
- Figura 185.** Prueba de refuerzos. Fotografía del autor. **página 115.**
- Figura 186.** Modelado digital del entrepiso semi-prefabricado en el software Robot de Autodesk. Autoría propia **página 116.**

Figura 187. Prueba empírica a la pieza prefabricada. Fotografía del autor. **página 116.**

Figura 188. Validación del entrepiso por correlación de la resistencia de sus componentes. Autoría propia **página 117.**

Figura 189. Pieza prefabricada para vigas de 15x20cm. Fotografía del autor **página 117.**

Figura 190. Molde original. Fotografía del autor. **página 118.**

Figura 191. Molde modificado con apoyo del maestro carpintero Adrián Flores Hernández. Fotografía del autor. **página 118.**

Figura 192. Revoltura de la pajarcilla para la mitad de las piezas. Fotografía del autor. **página 118.**

Figura 193. Fabricación de piezas en campo. Fotografía del autor **página 118.**

Figura 194. Almacenaje y secado de las piezas. Fotografía del autor **página 119.**

Figura 195. Colocación de piezas prefabricadas sobre viguetas. Fotografía del autor. **página 119.**

Figura 196. Vista superior de entrepiso semi-prefabricado de pajarcilla. Fotografía del autor. **página 119.**

Figura 197. Vista inferior/interior del espacio cubierto. Fotografía del autor. **página 119.**

Figura 198. Construcción a escala real del entrepiso semi-prefabricado de pajarcilla. Fotografía del autor. **página 124.**

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Cantidad total de normativas en la ONNCCE en comparación con las que están enfocadas al suelo y la tierra como material constructivo. Elaboración propia a partir de ONNCCE, 2023. **página 20.**

Gráfica 2. Módulo de ruptura en densidad 800, compactación variable. Elaboración propia. **página 92.**

Gráfica 3. Módulo de ruptura en densidad 900, compactación variable. Elaboración propia. **página 92.**

Gráfica 4. Módulo de ruptura en densidad 1000, compactación variable. Elaboración propia. **página 92.**

Gráfica 5. Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con densidad 800 compactadas manualmente. Elaboración propia. **página 92.**

Gráfica 6. Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con densidad 900 compactadas manualmente. Elaboración propia. **página 92.**

Gráfica 7. Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con densidad 1000 compactadas manualmente. Elaboración propia **página 92.**

Gráfica 8. Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con densidad 800 compactadas con prensa. Elaboración propia **página 92.**

Gráfica 9. Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con densidad 900 compactadas con prensa. Elaboración propia **página 92.**

Gráfica 10. Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con densidad 1000 compactadas con prensa. Elaboración propia. **página 92.**

Gráfica 11. Módulo de ruptura de las 18 probetas evaluadas a flexión. Serie de estabilización física y mecánica. Elaboración propia. **página 93.**

Gráfica 12. Carga resistida a 5mm de deflexión de las 18 probetas evaluadas a flexión. Serie de estabilización física y mecánica. Elaboración propia. **página 93.**

Gráfica 13. Módulo de ruptura en las 3 densidades compactando manualmente. Elaboración propia. **página 93.**

Gráfica 14. Módulo de ruptura en las 3 densidades compactado con prensa hidráulica. Elaboración propia **página 93.**

Gráfica 15. Módulo de ruptura promedio por longitud de fibra. Elaboración propia **página 95.**

Gráfica 16. Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con fibras medianas (entre 5 y 10cm). Elaboración propia. **página 95.**

- Gráfica 17.** Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con fibras largas (entre 10 y 15cm). Elaboración propia. **página 95.**
- Gráfica 18.** Carga resistida en promedio por longitud de fibra. Registros a 5mm de deflexión. Elaboración propia. **página 95.**
- Gráfica 19.** Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con fibras cortas (menores a 5cm). Elaboración propia. **página 95.**
- Gráfica 20.** Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con fibras cortas y medianas (menores a 10cm). Elaboración propia. **página 95.**
- Gráfica 21.** Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con fibras cortas, medianas y largas (menores a 15cm). Elaboración propia. **página 95.**
- Gráfica 22.** Módulo de ruptura a 5mm de deflexión de las 15 probetas evaluadas a flexión. Serie de estabilización por armazón. Elaboración propia. **página 96.**
- Gráfica 23.** Carga resistida a 5mm de deflexión de las 15 probetas evaluadas a flexión. Serie de estabilización por armazón. Elaboración propia **página 96.**
- Gráfica 24.** Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas sin agregado. Elaboración propia. **página 97.**
- Gráfica 25.** Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con mucílago. Elaboración propia. **página 97.**
- Gráfica 26.** Módulo de ruptura de acuerdo al estabilizante. Elaboración propia **página 98.**
- Gráfica 27.** Módulo de ruptura por cada estabilizante. Elaboración propia. **página 98.**
- Gráfica 28.** Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con pasta de cal. Elaboración propia **página 98.**
- Gráfica 29.** Gráfica carga-deflexión de las 3 probetas con mucílago de nopal y pasta de cal. Elaboración propia. **página 98.**
- Gráfica 30.** Carga resistida a 5mm de deflexión de las 15 probetas evaluadas a flexión. Serie de estabilización por armazón. Elaboración propia. **página 99.**
- Gráfica 31.** Gráfica carga-deflexión de 5 probetas con tierra arcillosa. Elaboración propia **página 100.**
- Gráfica 32.** Gráfica carga-deflexión de las 5 probetas con tierra limosa. Elaboración propia. **página 100.**
- Gráfica 33.** Gráfica carga-deflexión de 3 probetas con tierra arenosa. Elaboración propia. **página 100.**
- Gráfica 34.** Gráfica carga-deflexión de 3 probetas con tierra arenosa cribada. Elaboración propia. **página 100.**
- Gráfica 35.** Módulo de ruptura en las 3 densidades compactando manualmente. Elaboración propia. **página 100.**
- Gráfica 36.** Módulo de ruptura en las 3 densidades compactadas con prensa hidráulica. Elaboración propia. **página 100.**
- Gráfica 37.** Carga resistida a 5mm de deflexión de las 16 probetas evaluadas a flexión. Serie de estabilización homogénea. Elaboración propia **página 100.**
- Gráfica 38.** Carga-aplastamiento de las probetas con densidad 800. Elaboración propia **página 102.**
- Gráfica 39.** Carga-aplastamiento de las probetas con densidad 900. Elaboración propia. **página 102.**
- Gráfica 40.** Carga-aplastamiento de las probetas con densidad 1000. Elaboración propia **página 102.**
- Gráfica 41.** Resistencia por densidad a 5mm de aplastamiento. Elaboración propia **página 103.**
- Gráfica 42.** Carga resistida a 5mm de aplastamiento. Elaboración propia. **página 103.**
- Gráfica 43.** Resistencia a 5mm por probeta a compresión. Serie de estabilización física. Elaboración propia **página 103.**
- Gráfica 44.** Carga resistida a compresión a 5mm de aplastamiento. Serie de estabilización física. Elaboración propia. **página 103.**
- Gráfica 45.** Carga-aplastamiento de las probetas sin estabilizante. Elaboración propia. **página 104.**
- Gráfica 46.** Carga-aplastamiento de las probetas con mucílago de nopal. Elaboración propia. **página 104.**

- Gráfica 47.** Carga-aplastamiento de las probetas con pasta de cal. Elaboración propia. **página 105.**
- Gráfica 48.** carga-aplastamiento de las probetas con mucílago de nopal y pasta de cal. Elaboración propia. **página 105.**
- Gráfica 49.** Resistencia a 5mm por estabilizante. Elaboración propia. **página 105.**
- Gráfica 50.** Carga resistida por estabilizante. Elaboración propia. **página 105.**
- Gráfica 51.** Resistencia a 5mm de aplastamiento por estabilización química. Elaboración propia. **página 105.**
- Gráfica 52.** Carga resistida a 5mm de compresión por estabilización química. Elaboración propia **página 105.**
- Gráfica 53.** Carga-aplastamiento de probetas con tierra arcillosa. Elaboración propia. **página 106.**
- Gráfica 54.** Carga-aplastamiento de probetas con tierra limosa. Elaboración propia. **página 106.**
- Gráfica 55.** Carga-aplastamiento de probetas con tierra arenosa. Elaboración propia **página 106.**
- Gráfica 56.** Resistencia a 5mm por tipo de tierra. Elaboración propia **página 107.**
- Gráfica 57.** Carga resistida por tipo de tierra. Elaboración propia. **página 107.**
- Gráfica 58.** Resistencia por probeta de los 3 tipos de tierra. Elaboración propia. **página 107.**
- Gráfica 59.** Carga resistida por tipo de tierra en cada probeta. Elaboración propia. **página 107.**
- Gráfica 60.** Gráfica carga-deflexión de la mezcla con densidad entre 800 y 900 kg/m³. Elaboración propia. **página 109.**
- Gráfica 61.** Gráfica carga-deflexión de las probetas con densidad entre 900-1000kg/m³. Elaboración propia. **página 109.**
- Gráfica 62.** Diferencia entre los módulos de ruptura por densidad. Elaboración propia. **página 110.**
- Gráfica 63.** Gráfica de la carga resistida al variar la densidad. Elaboración propia. **página 110.**
- Gráfica 64.** Deflexión ante carga de norma. Se tiene como límite 15mm. Elaboración propia. **página 110.**
- Gráfica 65.** Piezas que cumplen con la prueba. Elaboración propia. **página 110.**
- Gráfica 66.** Deflexión de las piezas y cumplimiento. Elaboración propia. **página 110.**
- Gráfica 67.** Carga-deflexión de la tierra arcillosa. Elaboración propia. **página 111.**
- Gráfica 68.** Carga-deflexión de las piezas con tierra limosa. Elaboración propia. **página 111.**
- Gráfica 69.** Carga-deflexión con tierra arenosa. Elaboración propia. **página 111.**
- Gráfica 70.** Diferencia entre los módulos de ruptura por tierra. Elaboración propia **página 112.**
- Gráfica 71.** Gráfica de la carga resistida al variar la tierra. Elaboración propia. **página 112.**
- Gráfica 72.** Deflexión ante carga de norma. Se tiene como límite 15mm. Elaboración propia. **página 112.**
- Gráfica 73.** Piezas que cumplen con la prueba. Elaboración propia. **página 112.**
- Gráfica 74.** Deflexión de las piezas y cumplimiento. Elaboración propia. **página 112.**
- Gráfica 75.** Carga-deflexión de la tierra arcillosa. Elaboración propia. **página 113.**
- Gráfica 76.** Carga-aplastamiento de las piezas con tierra limosa. Elaboración propia. **página 113.**
- Gráfica 77.** Carga-aplastamiento con tierra arenosa. Elaboración propia **página 113.**
- Gráfica 78.** Diferencia entre los módulos de ruptura por tierra. Elaboración propia. **página 114.**
- Gráfica 79.** Deflexión ante carga de norma. Se tiene como límite 15mm. Elaboración propia. **página 114.**
- Gráfica 80.** Piezas que cumplen con la prueba. Elaboración propia. **página 114.**
- Gráfica 81.** Deflexión de las piezas y cumplimiento. Elaboración propia. **página 114.**
- Gráfica 82.** Gráfica carga-deflexión de la mezcla con densidad entre 800 y 900 kg/m³. Elaboración

propia. **página 115.**

Gráfica 83. Gráfica carga-deflexión de la mezcla con densidad entre 800 y 900 kg/m³. Elaboración propia. **página 115.**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cantidades de tierra y paja en seco por m³ de mezcla de pajarcilla. Elaboración propia a partir de Volhard, 2016. **página 40.**

Tabla 2. Pruebas de laboratorio y campo a realizar para la caracterización de tierras. Elaboración propia. **página 60.**

Tabla 3. Equipos, herramientas e instrumentos utilizados en caracterización. Elaboración propia. **página 61.**

Tabla 4. Cantidades por m³ para cada densidad. Elaboración propia a partir de experimentación y Volhard, 2016. **página 68.**

Tabla 5. Equipos, herramientas e instrumentos de medición utilizados en el diseño de mezcla. Elaboración propia. **página 68.**

Tabla 6. Equipos, herramientas e instrumentos de medición utilizados en pruebas a flexión. Elaboración propia. **página 72.**

Tabla 7. Equipos, herramientas e instrumentos de medición utilizados en pruebas a compresión. Elaboración propia. **página 73.**

Tabla 8. Cálculo de carga a resistir como piso ligero de madera de acuerdo con la combinación 1 de las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones. Elaboración propia. **página 77.**

Tabla 9. Resumen de resultados de pruebas de campo a tierra de Tlaxco. Elaboración propia. **página 80.**

Tabla 10. Resumen de resultados de pruebas de campo a tierra de Tlayacapan. Elaboración propia. **página 80.**

Tabla 11. Resumen de resultados de pruebas de campo a tierra de Atltzayanca. Elaboración propia. **página 81.**

Tabla 12. Resumen de tamizado en laboratorio para la tierra de Tlaxco, Tlaxcala. Elaboración propia **página 82.**

Tabla 13. Resumen de tamizado en campo de tierra de Tlaxco, Tlaxcala. Elaboración propia. **página 82.**

Tabla 14. Resumen de tamizado en laboratorio de la tierra de Tlayacapan, Morelos. Elaboración propia. **página 82.**

Tabla 15. Resumen de tamizado en campo de Tlayacapan, Morelos. Elaboración propia. **página 82.**

Tabla 16. Resumen de tamizado en laboratorio de Atltzayanca, Tlaxcala. Elaboración propia. **página 83.**

Tabla 17. Resumen de tamizado en campo de Atltzayanca, Tlaxcala. Elaboración propia **página 83.**

Tabla 18. Resumen de sedimentación. Porcentajes de la tierra de Tlaxco, Tlaxcala. Elaboración propia **página 84.**

Tabla 19. Resumen de sedimentación. Porcentajes de la tierra de Tlayacapan, Mor. Elaboración propia **página 84.**

Tabla 20. Porcentajes de la prueba de sedimentación de la tierra de Atltzayanca, Tlaxcala. Elaboración propia. **página 84.**

Tabla 21. Resultados de los límites de consistencia en 3 muestreos. Elaboración propia. **página 85.**

Tabla 22. Resultados de los límites de consistencia en 3 muestreos. Elaboración propia. **página 85.**

Tabla 23. Resultados de los límites de consistencia en 3 muestreos. Elaboración propia. **página 86.**

Tabla 24. Resultados de los límites de consistencia en 3 muestreos. Elaboración propia. **página 86.**

Tabla 25. Resultados de los límites de consistencia en 3 muestreos. Elaboración propia. **página 87.**

- Tabla 26.** Resultados de los límites de consistencia en 3 muestreos. Elaboración propia. **página 87.**
- Tabla 27.** Contracción en probeta prismática y en probetas cuadradas. Elaboración propia. **página 87.**
- Tabla 28.** Porcentaje de contracción en probeta prismática y en cuadrada. Elaboración propia **página 87.**
- Tabla 29.** Promedio de contracción por probeta. Elaboración propia. **página 87.**
- Tabla 30.** Resultados de prueba de cohesión en la tierra de Tlaxco. Elaboración propia. **página 88.**
- Tabla 31.** Resultados de prueba de cohesión para tierra de Tlayacapan. Elaboración propia. **página 88.**
- Tabla 32.** Resultados de la tierra de Atltzayanca. Elaboración propia. **página 88.**
- Tabla 33.** Resumen de resultados de las pruebas a la tierra de Tlaxco. Elaboración propia. **página 89.**
- Tabla 34.** Resumen de resultados de pruebas a la tierra de Tlayacapan. Elaboración propia. **página 89.**
- Tabla 35.** Resumen de resultados de pruebas a la tierra de Atltzayanca. Elaboración propia. **página 90.**
- Tabla 36.** Pruebas por serie a flexión y compresión. Elaboración propia. **página 91.**
- Tabla 37.** Resultados a flexión con estabilización física y mecánica. Elaboración propia. **página 91.**
- Tabla 38.** Tabla comparativa de la serie física y mecánica, probetas compactadas manualmente. Elaboración propia. **página 94.**
- Tabla 39.** Tabla comparativa de la serie física y mecánica, probetas compactadas manualmente. Elaboración propia. **página 94.**
- Tabla 40.** Resultados probetas a flexión con estabilización por armazón. Elaboración propia. **página 94.**
- Tabla 41.** Tabla comparativa de la serie por armazón. Elaboración propia. **página 97.**
- Tabla 42.** Resultados de probetas a flexión con estabilización química. Elaboración propia. **página 97.**
- Tabla 43.** Tabla comparativa de la serie de estabilización química. Elaboración propia. **página 99.**
- Tabla 44.** Resultados de probetas a flexión con diferentes tierras. Elaboración propia. **página 99.**
- Tabla 45.** Tabla comparativa de la serie de estabilización homogénea. Elaboración propia. **página 101.**
- Tabla 46.** Resultados de probetas a compresión con estabilización física. Elaboración propia. **página 102.**
- Tabla 47.** Tabla comparativa a compresión de estabilización física. Elaboración propia. **página 104.**
- Tabla 48.** Resultados a compresión con estabilización química. Elaboración propia. **página 104.**
- Tabla 49.** Tabla comparativa de compresión de estabilización química. Elaboración propia. **página 106.**
- Tabla 50.** Resultados a compresión con estabilización homogénea. Elaboración propia. **página 106.**
- Tabla 51.** Tabla comparativa de la serie a compresión de estabilización homogénea. Elaboración propia. **página 107.**
- Tabla 52.** Pruebas por serie a piezas prefabricadas. Elaboración propia. **página 108.**
- Tabla 53.** Resultados por desplazamiento a piezas prefabricadas. Elaboración propia **página 109.**
- Tabla 54.** Tabla comparativa de las piezas piezas prefabricadas evaluadas por desplazamiento. Serie estabilización física. Elaboración propia. **página 110.**
- Tabla 55.** Resultados por desplazamiento a piezas prefabricadas. Elaboración propia. **página 111.**
- Tabla 56.** Tabla comparativa de las piezas piezas prefabricadas evaluadas por desplazamiento. Serie estabilización homogénea. Elaboración propia. **página 112.**
- Tabla 57.** Resultados de evaluación por carga a piezas prefabricadas. Elaboración propia. **página 113.**
- Tabla 58.** Tabla comparativa de las piezas piezas prefabricadas evaluadas por carga. Serie estabilización homogénea. Elaboración propia **página 114.**
- Tabla 59.** Resultados de evaluación a refuerzos interiores. Elaboración propia. **página 115.**
- Tabla 60.** Cálculo de resistencia a cumplir por pieza. Elaboración propia. **página 117.**

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Bioconstrucción: Una disciplina que busca satisfacer las necesidades biológicas de hábitat humano a partir de la transformación de materiales mediante procedimientos que respeten las leyes de la naturaleza¹⁹⁵.

Arcilla: Producto de la erosión del feldespato y otros minerales. Actúa como aglomerante para pegar las partículas mayores de la tierra. Sus partículas tienen diámetros menores a 0.002mm¹⁹⁶.

Tierra aligerada: Masa de tierra mezclada con un agregado aligerante cuya densidad es menor a 1200g/m³. Grado medio de tierra aligerada va de los 600-800kg/m³ y la muy aligerada alrededor de los 300kg/cm³¹⁹⁷.

Pajarcilla: Técnica constructiva dentro de los entramados, la cual se logra mezclando paja y barbotina, para lograr una consistencia poco seca, pero que logre aglomerar las fibras. Para su fabricación se requiere una cimbra temporal contra la cual ejercer presión para su compactación¹⁹⁸.

Fibra-arcilla: Mezclas de tierra con una densidad en seco entre 1200-1700kg/cm³. La tierra es mezclada con paja u otras fibras y se introduce dentro de un molde. Es apropiada para hacer bloques¹⁹⁹.

Estabilización: Modificar las características de la tierra agregando componentes con baja o nula presencia (estabilización homogénea) o ajenos a su condición natural (estabilización heterogénea)²⁰⁰.

Prefabricado: Elemento o serie de elementos para edificación, que han sido fabricados por completo fuera de la obra, efectuándose en esta simplemente su colocación²⁰¹.

Entrepiso: Elementos rígidos que separan 2 ambientes de forma vertical, pueden ser de cubierta o techo²⁰².

195 Caballero Cervantes y Guerrero Baca, "Materiales constructivos".

196 Minke, "The properties of earth as building material".

197 Franz Volhard, "Building with earth-a historical overview", en Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth, English (Basel: Birkhäuser, 2016), 33-40.

198 Caballero Cervantes y Guerrero Baca, "Entramados".

199 Franz Volhard, "Building with earth-a historical overview", en Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth, English (Basel: Birkhäuser, 2016), 33-40.

200 Guerrero Baca, "Arquitectura de tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva".

201 D Ware y B Beatty, *Diccionario manual ilustrado de arquitectura*, Español (Barcelona: Gustavo Gili, s/f).

202 SENA Formación Abierta y a Distancia, "Entrepisos", Autoconstrucción, s/f.

BIBLIOGRAFÍA

Adobe Patrimonial. “El adobillo. Técnica constructiva en tierra y madera.”, el 28 de febrero de 2020. https://www.facebook.com/media/set/?set=a.2741545909245413&type=3&comment_id=2866602423406427&paipv=0&eav=AfZsjS7jOQP7T7n25fBMP5Wz7LrIF9uxa0xiaNOJ2pC420hs-by4K0u4b-5jaCm17WUI&_rdr.

American Society for Testing and Materials. D-143 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber, Pub. L. No. D-143 (2000). <https://x.com/comunaltaller/status/1295404402359009281>.

———. D-4318 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils (2000).

Araya-Letelier, G., J. Concha-Riedel, F. C. Antico, C. Valdés, y G. Cáceres. “Influence of natural fiber dosage and length on adobe mixes damage-mechanical behavior”. *Construction and Building Materials* 174 (el 20 de junio de 2018): 645–55. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.04.151>.

ASTM International. Eades and grim test method for determining the approximate lime/soil proportion for stabilization, Pub. L. No. ASTM C 977-02 (s/f).

Auroville Earth Institute. “Auram blocks data”. Building with earth. Consultado el 12 de noviembre de 2022. https://www.earth-auroville.com/auram_blocks_data_en.php.

———. “Compressed estabilized earth block”. Building with earth. Consultado el 12 de noviembre de 2022. https://www.earth-auroville.com/compressed_stabilised_earth_block_en.php.

———. “Hourdi roofing”. Architecture. Consultado el 12 de noviembre de 2022. <https://dev.earth-auroville.com/hourdi-roofing/>.

Ávila Boyas, Esmeralda, y Luis Fernando Guerreño Baca. “El mucílago de opuntia ficus como estabilizante en recubrimientos de tierra”. *Memorias 18 SIACOT “Tierra, cultura, hábitat resiliente y desarrollo sostenible”*, octubre de 2018, 115–26.

Ávila Boyas, Esmeralda, Luis Fernando Guerrero Baca, y Blas Antonio Tepale Gamboa. “Recubrimientos de tierra estabilizada con cal y mucílago de Opuntia ficus para la protección de superficies de tapia”. *Memorias 19 SIACOT “Conservación sostenible del paisaje: tierra y agua”*, octubre de 2019, 138–49.

Bloque aligerado de tierra y paja. “Swallow brick: bloque para bioconstrucción”. Consultado el 17 de noviembre de 2022. <https://www.swallowbrick.com/bloque/>.

Caballero Cervantes, A, y Luis Fernando Guerrero Baca. “Técnicas de bioconstrucción”. En *Experiencias de bioconstrucción: conceptos generales y visiones desde México*, 1ra edición., 52–59. Ciudad de México: Bonilla Artigas, 2021.

Caballero Cervantes, Alejandra. “Notas sobre bioconstrucción”. Tlaxco, Tlaxcala, s/f.

Caballero Cervantes, Alejandra, y Luis Fernando Guerrero Baca. “Curso de Inmersión en la Bioconstrucción”. Tlaxco, Tlaxcala, junio de 2021.

———. “Entramados”. En *Experiencias de bioconstrucción: conceptos generales y visiones desde México*, 1ra edición., 87–97. Ciudad de México: Bonilla Artigas, 2021.

———. “Materiales constructivos”. En *Experiencias de bioconstrucción: conceptos generales y visiones desde México*, 1ra edición., 21–50. Ciudad de México: Bonilla Artigas, 2021.

Caballero Cervantes, Alejandra, Humberto Hernández Flores, y Alan Sosa Contreras. “Proceso constructivo de pajarcilla para entresijos”. el 22 de abril de 2022.

Carazas Aedo, Wilfredo, y Cooperación Comunitaria. “Materia prima”. En *Construir con bajareque cerén. Experiencias en el contexto de Oaxaca, México*, 1ra edición., 20–41. Ciudad de México: a+terre ediciones, 2021.

Cárdenas Guillén, Juan Martín. “Estabilización de tierra por métodos tradicionales”. En *Construcción con tierra estabilizada*, 25–28. Editorial escuela del hábitat, UASLP, 1994.

Casares Ruiz, Guillermo, y Rosa Gustamante Montoro. “Arquitectura de tierra en el S.XXI”, s/f.

Castañeda Nolasco, Gabriel. “Antecedentes motivadores para la búsqueda de tecnologías apropiadas y apropiables para la vivienda de producción social”. En *Domotej. Tecnología para techos de vivienda de producción asistida*, 2da edición., 19–110. Tuxtla Gutiérrez: Universidad Autónoma de Chiapas, 2022.

———. “Evaluación de la tecnología para techos Domotej”. En *Domotej. Tecnología para techos de vivienda de producción asistida*, 2da edición., 141–226. Tuxtla Gutiérrez: Universidad Autónoma de Chiapas, 2022.

Cevallos Salas, Patricio. “La construcción con tierra en el Ecuador y la necesidad de la norma”. *Memorias 15 SIACOT “Tierra, sociedad, comunidad”*, 2015, 603–14.

Chiappero, Rubén Osvaldo, y María Clara Supisiche. “Arquitecturas de tierra”. En *Arquitectura en tierra cruda*. Argentina: Nabuko, 2003.

Cid, J., F. R. Mazarrón, y I. Cañas. “Las normativas de construcción con tierra en el mundo”. *Informes de la Construcción* 63, núm. 523 (el 30 de septiembre de 2011): 159–69. <https://doi.org/10.3989/ic.10.011>.

Costi de Castrillo, Maria, Ioannis Ioannou, y Maria Philokyprou. “Reproduction of traditional adobes using varying percentage contents of straw and sawdust”. *Construction and Building Materials* 294 (el 2 de agosto de 2021): 123516. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123516>.

Daneels Annick. “Introducción”. En *Arquitectura Mesoamericana de Tierra I*, editado por Annick Daneels, 1ra edición., 1:11–23. Ciudad de México: Instituto de Investigaciones Antropológicas. Universidad Nacional Autónoma de México, 2020.

———. “La construcción de tierra ¿El prototipo de la arquitectura mesoamericana?” En *Arquitectura Mesoamericana de Tierra I*, editado por Annick Dannels, 1ra edición., 1:25–37. Ciudad de México: Instituto de Investigaciones Antropológicas. Universidad Nacional Autónoma de México, 2020.

Dávila Urrejola, Valentina. “El tabique-adobillo como sistema constructivo”. En *El adobillo. Cultura constructiva de Valparaíso*, editado por Álvaro Riquelme Bravo, 2da edición., 20–40, 2022.

Dávila Urrejola, Valentina, y Javiera Contreras Silva. “¿Qué es el adobillo?” En *El adobillo. Cultura constructiva de Valparaíso*, editado por Álvaro Riquelme Bravo, 2da edición., 11–19, 2022.

Duriez, M., y J. Arrambide. *Nouveau traite de matériaux de construction tome II*. 2da edición., 1962.

Giaireton, Marta, Dmytro Dizhur, y Hugh Morris. “Material characterisation of heavy-weight and lightweight adobe brick walls and in-plane strengthening techniques”. *Construction and Building Materials* 310 (el 6 de diciembre de 2021): 125309. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125309>.

González Calderón, Alleck J., y Luis Fernando Guerrero Baca. “Bajareque contemporáneo para climas semi-áridos. Sistema alternativo para la vivienda rural de Torreón, México”. *Memorias 20 SIACOT “Revive la tierra”*, abril de 2022, 537–47.

Guerrero Baca, Luis Fernando. “Arquitectura de tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva”. *Apuntes* 20, núm. 2 (2007): 182–201.

———. “Pasado y porvenir de la arquitectura de tapia”. *Bitácora arquitectura*, núm. 22 (el 6 de junio de 2011): 6. <https://doi.org/10.22201/fa.14058901p.2011.22.25519>.

Guillén Guillén, Cesar Armando, Gemma Luz Sylvia Verduzco Chirino, y Alberto Muciño Vélez. “Determinación del límite de contracción lineal de los suelos”. Ciudad de México, s/f.

Guillén Guillén, Cesar, Alberto Muciño Vélez, y Gemma Luz Sylvia Verduzco Chirino. “Determinación de los límites líquidos y plásticos de suelos”. Ciudad de México, s/f.

Gutierrez, Armor, Alan Chandler, Elena Shilova, Bamdad Ayati, Paul Nichols, Faith Omowunmi Ogundare, Busra Ciftci, et al. “Sugarcrete. Slab report”. London, el 7 de noviembre de 2022. <https://uel.ac.uk/sites/default/files/uel-sugarcrete-slab-report--7-nov-2022.pdf>.

Hernández Pocero, Josune. “Construcción con tierra. Análisis, conservación y mejora. Un caso práctico en Senegal”, 2016.

Jorquera Silva, Natalia. “Culturas sísmicas en tierra. Estrategias locales de respuesta de la arquitectura de tierra chilena”. *Memorias 13 SIACOT “Material universal, realidades locales”*, agosto de 2013, 19–31.

Juárez Badillo, Eulalio, y Alfonso Rico Rodríguez. “Granulometría en suelos”. En *Mecá-*

nica de Suelos Tomo 1. Fundamentos de la Mecánica de Suelos, 97–122. Limusa, 2005.

Luis Fernando Guerrero Baca. “Sistemas constructivos, medio ambiente y preservación del patrimonio arqueológico de tierra”. En *Arquitectura Mesoamericana de Tierra I*, editado por Annick Dannels, 1ra edición., 1:415–33. Ciudad de México: Instituto de Investigaciones Antropológicas. Universidad Nacional Autónoma de México, 2020.

Michiels, Tim LG, y Carina Fonseca Ferreira. “Técnicas de estabilización sismorresistente para mejorar el comportamiento estructural de edificios históricos de tierra”. *Memorias 13 SIACOT “Material universal, realidades locales”*, agosto de 2013, 31–46.

Minke, Gernot. “Earth as a building material: the essentials”. En *Building with earth. Design and Technology of a Sustainable Architecture*, English. Basel: Birkhäuser, 2006.

———. “The properties of earth as building material”. En *Building with earth. Design and technology of a sustainable architecture*, 19–35. Berlin: Birkhäuser, 2006.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c. 2. Procedimiento de muestreo e identificación de muestras en campo (2003).

———. 3. Procedimiento para la preparación de las muestras de laboratorio (2003).

———. 5. Método de prueba para determinar el análisis granulométrico, Pub. L. No. NMX-C-416-ONNCCE-2003 (2003).

———. 6. Método de prueba para la determinación de los límites de consistencia (2003).

———. 7. Método de prueba para la determinación de la contracción lineal (2003).

———. 12. Método de prueba para la determinación del equivalente de arena en suelos y agregados finos (2003).

———. “Catálogo de normas ONNCCE”. Ciudad de México: ONNCCE, 2023.

———. Industria de la construcción – Bloques de tierra comprimida estabilizados con cal - Especificaciones y métodos de ensayo, Pub. L. No. NMX-C-508-2015 (2014).

———. 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, Pub. L. No. NMX-C-463-2009 (2009).

———. Industria de la construcción - Componentes para sistemas de losas prefabricadas de concreto - Especificaciones y métodos de ensayo, Pub. L. No. NMX-C-406-ONNCCE-2019 (2019).

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, s.c. Industria de la construcción - concreto - Determinación de la resistencia

a la flexión usando una viga simple con carga en el centro del claro, Pub. L. No. NMX-C-303-2004, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, s.c. (2004).

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación s.c. Industria de la construcción - Mampostería - Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines - Método de ensayo, Pub. L. No. NMX-C-036-ONNCCE-2013 (2013).

———. Industria de la construcción - Vivienda de madera y equipamiento urbano - Métodos de ensayo para determinar las propiedades mecánicas de la madera de tamaño estructural, Pub. L. No. NMX-C-446-ONNCCE-2006 (2006).

———. Industria de la construcción -Paneles de uso estructural aplicados en sistemas constructivos- Especificaciones y métodos de ensayo, Pub. L. No. NMX-C-405-ONNCCE-2014 (2014).

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. “1. Generalidades”. Consultado el 28 de noviembre de 2022. https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s01.htm#2a.

———. “6. Textura del suelo”. Consultado el 28 de noviembre de 2022. https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm.

———. “11. Clasificación de los suelos”. Consultado el 21 de julio de 2024. https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s11.htm#83a.

Paul, Shantanu, Mohammad Shariful Islam, y Mohammad Iqbal Hossain. “Suitability of Vetiver straw fibers in improving the engineering characteristics of compressed earth blocks”. *Construction and Building Materials* 409 (el 15 de diciembre de 2023): 134224. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.134224>.

Pérez Castellanos, Nora Adriana. “Los adobes de la gran pirámide de Cholula: una mirada desde la ciencia e ingeniería de materiales”. En *Arquitectura Mesoamericana*, 1ra edición., 143–68. Ciudad de México: Instituto de Investigaciones Antropológicas. Universidad Nacional Autónoma de México, 2021.

Pérez de Salazar Vera, Francisco J. “Tecnologías de la arquitectura con tierra sin conocimiento”. Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, 1989.

Rodríguez Figueroa, Andrea, y Leopoldo Valillas Coalla. “Materiales para la construcción de las casas nahuas”. En *Arquitectura en el código Florentino y los primeros memoriales*, 2:5–49, s/f.

Rodríguez Larraín, Sofía, Sofía Montoya, Stephanie Gil, Silvia Onnis, y Julio Vargas Neumann. “Aportes de la enseñanza de la arquitectura en tierra a la mitigación de riesgos”, diciembre de 2013.

Rodríguez Licea, Minerva, Edmundo Arturo Figueroa Viruega, y Miguel Fernando Elizondo Mata. “El estado de conservación de la arquitectura de tierra en la ciudad de Colima, México”. *XIV Foro académico. Diálogos: las voces del patrimonio cultural*, noviembre de 2017.

Rodríguez Licea, Minerva, y Luis Fernando Guerrero Baca. “Impacto en los muros de adobe por el uso de recubrimientos con cemento en el occidente de México”. *Memorias 19 SIACOT “Conservación sostenible el paisaje: tierra y agua”*, octubre de 2019, 456–68.

Sánchez Calvillo, Adrià, Elia Mercedes Alonso Guzmán, y María del Carmen López Núñez. “Vulnerabilidad sísmica y la pérdida de la vivienda de adobe en Jojutla, Morelos, México, tras los sismos de 2017”. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, núm. 10 (el 30 de junio de 2021): 9–29. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v2i10.162>.

Sánchez Mora, Raúl. “Machimbloque de tierra comprimida estabilizada”. En *Tercer Simposio CIB/RILEM*. México D.F.: SECOFI, 1983.

Santibáñez R., Daniel. “Compendio de normas chilenas de mecánica de suelos”, 2018.

Secretaría de asentamientos humanos y obras públicas. “Los que saben son los que la viven”. *Suplemento. Las casas de los mexicanos*. Distrito Federal, 1980.

Secretaría de Desarrollo Urbano, y Secretaría de Obras y Servicios. Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal § (2017).

Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda, y Secretaría de Obras y Servicios. Normas Técnicas Complementarias, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal § (2017).

———. Normas Técnicas Complementarias Sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal § (2017).

SENA Formación Abierta y a Distancia. “Entrepisos”. Autoconstrucción, s/f.

Souza, Eduardo. “From Agro-Waste to Sustainable Structures: Concrete Alternatives Made from Sugarcane”. *Archdaily*, mayo de 2023. https://www.archdaily.com/1001501/from-agro-waste-to-sustainable-structures-concrete-made-from-sugarcane?fbclid=PAAaZRgUIQPc-hizA1b76w8W3hb7LsbW3YbgqpE5enpn-TEZK5ZWEr3KxsSQdg_aem_ASQa54QvSMdWSmq_VoD-fhv20ZHntpGO-12VURG0-VbGnHLk1bzq1vaYIJNQSet_z8_A.

United Nations Centre for Human Settlements (Habitat). “Characteristics of soil stabilizers”. En *Earth construction technology*, 22–34. Nairobi: United Nations, 1992.

———. “Floors above ground level”. En *Earth Construction Technology*, 74–81. Nairobi: United Nations, 1992.

———. “Fundamentals for soil science”. En *Earth construction technology*, 14–21. Nai-

robi: United Nations, 1992.

———. “Principles for soil stabilization”. En *Earth construction technology*, 14–21. Nairobi: United Nations, 1992.

Vargas Neumann, Julio. “Consideraciones para incluir la técnica del tapial en la normativa de tierra peruana”. *Memorias 13 SIACOT “Material universal, realidades locales”*, agosto de 2013, 885–95.

Volhard, Franz. “Building with earth-a historical overview”. En *Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth*, English., 33–40. Basel: Birkhäuser, 2016.

———. “Building with timber and earth”. En *Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth*, English., 15–30. Basel: Birkhäuser, 2016.

———. “Floors and ceilings”. En *Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth*, English., 107–18. Basel: Birkhäuser, 2016.

———. “Light earth brick and blocks”. En *Light Earth Building*, English., 130–34. Basel: Birkhäuser, 2016.

———. “Light Earth Panels”. En *Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth*, English., 135–36. Basel: Birkhäuser, 2016.

———. “Preparation of clay slip”. En *Light Earth Building*, English., 57–65. Berlin: Birkhäuser, 2016.

———. “Preparation of the light earth mix”. En *Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth*, English., 69–78. Basel: Birkhäuser, 2016.

———. “Protection of the construction”. En *Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth*, English., 159–62. Basel: Birkhäuser, 2016.

———. “Self-produced bricks and panels”. En *Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth*, English., 136–41. Basel: Birkhäuser, 2016.

———. “Soil and earth”. En *Light Earth Building. A handbook for building with wood and earth*, English., 41–52. Basel: Birkhäuser, 2016.

Ware, D, y B Beatty. *Diccionario manual ilustrado de arquitectura*. Español. Barcelona: Gustavo Gili, s/f.

Yamín Lacouture, Luis Eduardo, Camilo Phillips Bernal, Juan Carlos Reyes Ortiz, y Daniel Ruiz Valencia. “Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada”. *Apuntes. Revista de estudios sobre patrimonio cultural* 20, núm. 2 (enero de 2007): 286–303.

ANEXO 1: Manual de pruebas para determinar el tipo de tierra

Preparación

El método de obtención, envase, identificación, transporte y preparación de las muestras en campo se aborda en el capítulo 2 de la NMX-C-416-ONNCCE-2003. Se diferencia la muestra entre inalterada y alterada, subdivididas de acuerdo con la zona o profundidad de donde se obtienen. Además, se explica la prueba de dilatancia, tenacidad y resistencia en seco, que resultan similares a las abordadas en la clasificación por pruebas de campo. Para la preparación de las muestras en laboratorio se tiene el capítulo 3 de la misma normativa. Este apartado se enumeran los procesos que van desde el secado en horno, la disgregación manual y el cuarteo de la muestra.

Clasificación

1 Consistencia en seco

1. Con una muestra de suelo seco, se intenta romper presionando entre el pulgar y el índice, o en caso de ser necesario, con la palma de la mano

Se evaluará con el siguiente criterio:

0=no tiene coherencia (grano suelto)

1=se deshace en polvo o granos sueltos bajo muy ligera presión (blando)

2=resiste una presión ligera, pero se puede romper fácilmente (ligeramente duro)

3=resiste una presión moderada, se necesita la palma para romperlo (duro)

4=resiste gran presión, se rompe con la palma con dificultad (muy duro)

5=resiste presión extrema, no se puede romper (extremadamente duro)

2 Corte de esfera

1. Con tierra húmeda se forma una esfera

2. Se introduce una espátula o elemento delgado

-si se quedan restos de partículas (tierra arcillosa)

-si sale limpio y n cuesta introducirlo (tierra arenosa)

3 Ensayo de sacudimiento

1. Se toma una muestra de suelo mojada previamente

2. Con eso se debe formar una bola de 3-5cm de diámetro. Se debe observar el brillo

3. Se sacude rápidamente de un lado a otro en la palma de la mano.

4. Se evaluará de acuerdo con la velocidad de la pérdida de brillo y de secado

4 Bola-rollo-bola

1. Con tierra húmeda se forma una bola de 2-3cm de diámetro

2. Posteriormente se forma un rollo de 3mm de diámetro aprox.

*si se parte antes de llegar al diámetro indicado, deberá humedecerse hasta llegar a los 3mm.

3. Con esa mezcla se forma una bola nuevamente

-si no se logra (alto contenido de arena)

4. Se toma la bola entre los dedos índice y pulgar

-si se requiere mucha fuerza para deshacerse (alto contenido de arcilla)

-si se deshace fácilmente (poca arcilla)

Clasificación: Pruebas de campo				
Tierra de:				
Plasticidad (bola- cordón)	Consistencia en seco	Reacción ensayo de sacudimiento	Límite Plástico (método del rollo)	Grupo de suelos SUCS
0	0	muy rápida	ninguna	SP
0	0-1	rápida	muy baja	SM
1	0-1	rápida	baja	SC
0	1-2	rápida-lenta	media	ML
2	2-4	ninguna-m lenta	media	CL
1	1-3	lenta	ligera	OL
1	1-3	lenta-ninguna	ligera-media	MH
3	3-5	ninguna	alta	CH
2-3	2-4	ninguna-m lenta	liger-media	OH

Composición

5 Tamizado en Laboratorio

1. Se comienza por obtener un volumen conocido (500 gramos) de tierra previamente apisonada. Procurando dejar fuera materia mayor a 2.50cm aproximado.
2. A partir de la adaptación de la NMX-C-416-ONNCCE-2013 capítulo 5, se sugiere utilizar 4 mallas: 4,10,40,200, junto con su tapa y charola de base.
3. Se realiza el cribado con una tamizadora vibratoria con una amplitud de 80 durante 4 minutos.
4. La materia retenida por cada malla, se pesa y se determinará el porcentaje de cada uno

6 Tamizado en campo

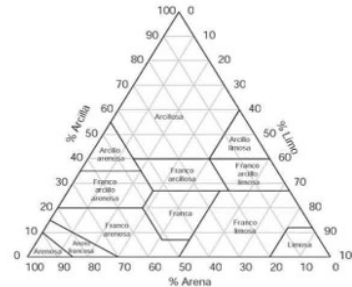
1. Se comienza por obtener un volumen conocido (500 gramos) de tierra previamente apisonada. Procurando dejar fuera materia mayor a 2.50cm aproximado.
2. Se criba con la malla no. 4 de (4.75mm) para separar las gravas así como guijarros.
3. Posteriormente se comienza a cernir la tierra por una malla no.10 (2mm) donde se obtendrán las arenas medianas.
4. La siguiente malla a utilizar será no. 40 (0.425mm) para obtener las arenas finas.
5. Por último se requerirá una malla no.200 (0.075) con la finalidad de obtener las partículas finas, donde se encuentran los limos y las arcillas.
6. La materia retenida por cada malla, se pesa y se determinará el porcentaje de cada uno
 - Si menos del 50% no pasa la malla no.200 (se tiene una tierra de grano grueso SGG)
 - Si el 50% o más pasa la malla no.200 (se tiene una tierra de grano fino SGF)

Evaluación de Composición: Tamizado en Laboratorio					
Tierra de:		Muestreo		Cantidad de material	
				500	gramos
Malla	Peso del tamiz (PT)	Peso con mat retenido (PMT)	Materia retenida (MR)	Porcentaje sobre gramos	Clasificación
#	gramos	gramos	= PMT-PT gramos	%	
10					Arenas gruesas
40					Arenas medianas
200					Arenas finas
base					Limos y arcillas

7,8 Sedimentación

1. Un frasco de vidrio se llena a la mitad con tierra previamente apisonada. Procurando dejando fuera materia mayor a 2.50cm aproximado.
2. Se termina de llenar el recipiente con agua, sin dejar burbujas, espuma o vacíos
3. Se agita durante 2 minutos aproximadamente y se deja reposar
4. A los 15 segundos se nota la Arena/Grava
5. A los 15 min se nota la cantidad de limo
6. Se deja el recipiente hasta que se aclare el agua, la última marca nos indica el contenido de arcilla
 - Entre mayor sea el tiempo que tarda el agua en aclararse (más fina es la arcilla)
 - Si al final de la prueba la tierra sobrepasó la marca inicial en seco (arcilla expansiva)

Evaluación de Composición: Sedimentación			
Tierra de:		Cantidad de material	
		1/2 frasco de vidrio	
Tiempo transcurrido	Componente	Altura (cm)	Porcentaje
0:00	Inicial		
0:00:15	Arenas/Gravas		
0:15:00	Limo		
0:00:00	Arcilla		
	Final		



Consistencia

9. Límite líquido en laboratorio (NMX-C-416-ONNCCE)

1. La muestra deberá tamizarse por la malla 4 (5mm) y secarse completamente al horno a una temperatura que no exceda los 60°.
2. Una vez secos se volverá a tamizar, ahora por la malla 40 (0.05mm) y se tomarán 300grms. Límite

líquido 100 g, límite plástico 20 g, límite de contracción 30 g, ensaye de chequeo 250 g.

3. Se debe ajustar la caída de la taza, hasta obtener su mayor altura, utilizando el calibrador de 10mm se verifica que la distancia entre el punto de percusión y la base sea de 10 mm exactamente.
*si la taza se levanta por encima del calibre o no se escucha ningún sonido debe realizarse un ajuste.
4. Se coloca la muestra en el plato de evaporación, se agrega agua destilada y se mezcla hasta que se logre una mezcla homogénea. Hasta lograr una mezcla que requiera entre 15-20 golpes.
5. Tomar una porción y colocarla en la taza con la espátula, nivelado a 10 mm implica un volumen de material de aproximadamente 16 cm³ y una longitud de surco, medida sobre la superficie nivelada de aproximadamente 63 mm.
6. Dividir la pasta pasando el acanalador a lo largo del eje de simetría de la taza. La ranuración se debe efectuar son el mínimo de pasadas
7. Gire la manivela a razón de 2 golpes por segundo hasta que la pasta se junte al centro. Reportar el número de golpes necesarios.
8. Retirar aproximadamente 10g del material del fondo del surco. Pasarlo a un recipiente hermético y determinar su humedad.
9. Repetir la operación por lo menos 2 veces más, de la condición más húmeda a la más seca, batiendo la pasta con la espátula, hasta obtener una consistencia que requiera 35 golpes (aproximado).

Con ayuda del gráfico y el registro de ensayos, el límite líquido del suelo estará dado como la humedad correspondiente a la intersección de la curva de flujo con la abscisa de 25 golpes, aproximando al entero más próximo.

Evaluación de Limite Líquido: NMX-C-416-ONNCCCE						
Tierra de:			Cantidad de material		Por malla	
Municipio, Estado			150 gramos		No.40 (0,05mm)	
Número de Golpes	Masa del recipiente	Masa del recipiente con muestra húmeda (mrh)	Masa del recipiente con muestra seca (mrs)	Cantidad de Agua W (mrh-mrs)	Peso seco SC (mrs-r)	Limite Líquido (w/sc)
					A 25 Golpes	



10 Límite líquido en campo (Prueba de LMSE)

1. Verter en un recipiente de plástico 400g de suelo seco, previamente cribado en malla #40 y agregar 80ml de agua (correspondiente al 20%). Se mezcla hasta que sea maleable. En caso de ser necesario agregar más agua, reportando siempre la cantidad de agua.
2. Una vez obtenida la mezcla maleable, se procede al llenado del recipiente cilíndrico (5 de diam. x 7.5cm de altura). Enrasar y evitar burbujas al interior.
3. Sobre esto se apoya una varilla de 3/8" de 50cm. Se sostiene por una mano y se guía con la otra, manteniendo siempre perpendicular. Se suelta la varilla y si esta penetra 2cm se encuentra su límite líquido
4. Cuando se obtiene es LL, se toma una muestra de 5g, se coloca sobre un cuadrado de vidrio (10x10cm) previamente tarado.
5. Se obtiene el peso del cuadrado con la mezcla y se deja secar en un lapso de 5-7 días o en un horno eléctrico regulable en periodos de 30min a 110°
6. La prueba termina cuando ya no existe una variación en el peso

El Límite Líquido será el contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso seco, calculado como $LL = (\text{contenido de agua de la muestra del LL} / \text{peso seco de la muestra de LL}) \times 100$

Evaluación de Limite Líquido (WL): Prueba LMSE						
Tierra de:			Cantidad de material		Por malla	
Municipio, Estado			150 gramos		No.40 (0,05mm)	
Número de Muestreo	Masa del recipiente	Masa del recipiente con muestra húmeda (mrh)	Masa del recipiente con muestra seca (mrs)	Cantidad de Agua W (mrh-mrs)	Peso seco SC (mrs-r)	Limite Líquido (w/sc)*100
1						
2						
3						
4						
5						
					Promedio	

11 Límite plástico en laboratorio (NMX-C-416-ONNCCE)

1. Tomar aproximadamente 20 gramos del plato de evaporación de la prueba del límite líquido en aquella etapa donde la pasta de suelo se vuelva suficientemente plástica para hacer una esfera.
2. Amasar la muestra entre las manos y hacerla rodar con la palma de la mano conformando un cilindro

3. Cuando el cilindro alcance un diámetro de 3mm, doblar, amasar nuevamente y volver a conformarlo
4. Repetir la operación hasta que el cilindro se disgregue aproximadamente al diámetro de 3mm
*si la disgregación se produce con un diámetro mayor, se tomará como bueno, siempre y cuando, previamente se haya logrado un diámetro de 3mm
5. Reunir las fracciones del cilindro, colocarlo en un recipiente tarado y registrar su humedad
6. Repetir la operación con 2 porciones más. Se recomienda conseguir una humedad ligeramente mayor que el límite, en el límite y menor que el límite.

El límite plástico será el promedio de las 3 determinaciones, sin diferir en un 2%

Una vez obtenidos ambos límites, se podrá obtener el índice de plasticidad

IP=Límite Líquido-Límite plástico

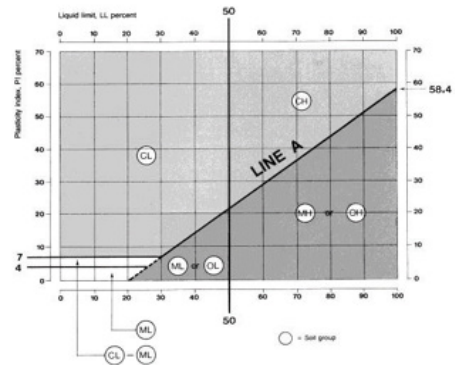
Con estos datos y con ayuda del gráfico de plasticidad podremos saber el tipo de suelo

12 Límite plástico en campo (Prueba de LMSE)

1. Se toma una porción del material sobrante de la prueba de LL. Se amasa suavemente entre las manos dándole una forma esférica. Si se cuenta con mucha humedad, lo que imposibilite la formación de la esfera, se puede reducir este contenido de humedad con una servilleta o papel o dejándola secar unos minutos.
2. Una vez obtenida la esfera, esta se coloca en una placa de vidrio (20x20cm), moldeando el material hasta obtener un cilindro con diámetro aproximado de 5mm y largo de entre 5y 10cm
3. Posteriormente se busca lograr un diámetro de 3mm, cuando se esté acercando a esta dimensión, el cilindro tiene que empezar a agrietarse y fragmentarse, en caso de que esto no suceda se debe repetir la operación. Cuando se fragmenta significa que llegó a su límite plástico
4. Una vez el material se encuentra en su límite plástico, se obtiene el peso del cuadrado con la mezcla y se deja secar en un lapso de 5-7 días o en un horno eléctrico regulable en periodos de 30min a 110°
5. Se debe pesar la muestra constantemente en caso del horno cada 30min
6. La prueba termina cuando ya no existe una variación en el peso

El límite plástico será la humedad expresada en porcentaje con respecto al peso en seco, calculado como $LP = (\text{contenido de agua de la muestra de LP} / \text{peso seco de la muestra de LL}) * 100$

Evaluación de Límite Plástico (Wp): NMX-C-416-ONNCE/LMSE						
Tierra de:			Cantidad de material		Por malla	
Municipio, Estado			50 gramos		No.40 (0,05mm)	
Número de Muestreo	Masa del recipiente	Masa del recipiente con muestra húmeda (mrh)	Masa del recipiente con muestra seca (mrs)	Cantidad de Agua W (mrh-mrs)	Peso seco SC (mrs-r)	Límite Plástico (w/sc)*100
1						
2						
3						
Promedio						



Contracción

13 Contracción cuadrada/rectangular (Prueba LMSE)

1. Verter en un recipiente de plástico 10g de suelo seco cribado previamente por la malla #40 aplicando la cantidad de agua correspondiente al límite líquido, mezclando hasta que sea maleable
2. Determinar las medidas interiores del molde. Después se recubre el interior con aceite o vaselina
3. Se llena el molde con el material mezclado, se va llenando de poco a poco, golpeando sobre una mesa para ir compactando y evitando las burbujas de aire, se enraza con ayuda del abate lenguas y se deja secar a la sombra un periodo de 16-24 horas.
4. Después de este secado se desmolda la probeta y se deja secar en un lapso de 1-3 días
6. Una vez terminado el secado, se toman las dimensiones de la probeta y se registra el resultado

La contracción lineal se calcula como: $CL = ((\text{longitud inicial} - \text{longitud final}) / \text{longitud inicial}) * 100$

Evaluación de Límite de Contracción (Wc): Prueba de LMSE								
Tierra de:				A partir de:				
Municipio, Estado				Pruebas de límites de consistencia				
Número de Muestreo	Largo Inicial (Li)	Ancho Inicial (Ai)	Alto Inicial (Hi)	Largo Final (Lf)	Ancho Final (Af)	Alto Final (Hf)	Volumen Inicial	% de contracción
1								
2								
3								
Promedio								

Cohesión

1.4 Prueba 8

1. Con tierra cribada se comienza a hacer una pasta mezclándolo poco a poco con agua.
2. Una vez se tenga una masa plástica, se rellena el molde en forma de 8 y se deja secar
3. Una vez seca la pastilla, se coloca en los ganchos, quedando suspendida
4. Se va agregando peso de forma ocnstante hasta llegar al quiebre de la pastilla

El cálculo de la cohesión será el peso soportado entre el área de la pastilla en la zona más delgada

1.5 Churrometría

1. Se obtienen 100 gramos de tierra tamizada por la malla 1 mm. O bien, lo sobrante de los límites de consistencia.
2. Se coloca en un tazón y se va agregando agua poco a poco hasta lograr una mezcla homogénea
3. Una vez lograda una mezcla homogénea se procede a realizar el churro, no se debe tardar más de 1 min en realizarlo (aprox. de 20x1.5cm). Se puede ir enrollando en una hoja de papel para lograrlo.
4. Una vez obtenida la longitud deseada, se acerca a la orilla de la mesa, se va jalando la hoja, en dirección perpendicular a la superficie de la mesa
5. Se van recolectando los pedazos que se van desprendiendo
6. Se miden todos los trozos, se recomienda que la diferencia entre el más grande y el más chico no sea mayor a 1cm
7. Se repite este proceso 3 veces más con la finalidad de corroborar los resultados.

Se tomará como resultado el promedio de todas las pruebas realizadas.

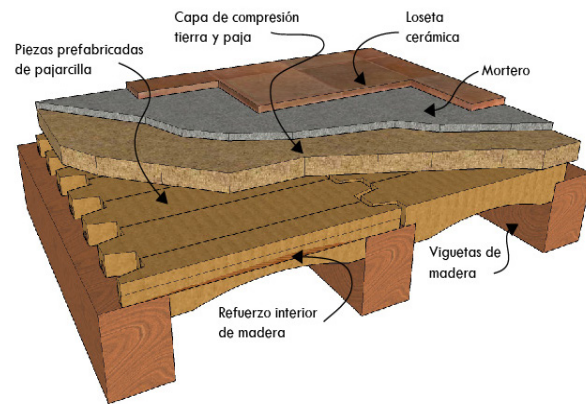
- 0-3cm=tierra muy arenosa, buena para tapial
- 3-6cm=tierra arenosa, buena para COB o adobe
- 6-9cm=tierra arcillosa, buena para adobe y bajareque
- 9-12cm= tierra muy arcillosa, buena para pajarcilla y morteros de pega
- 12-15cm=tierra demasiado arcillosa para ser usada en construcción sin otro agregado

Cohesividad: Churrometría		
Tierra de:	Municipio, Estado	
Primer Ensayo (cm)	Segundo Ensayo (cm)	Tercer Ensayo (cm)
Promedio		

ANEXO 2: HOJA DE PRODUCTO

DESCRIPCIÓN

Sistema de entepiso que consta de una estructura principal de viguetas de madera sobre las que se colocan piezas prefabricadas de pajarcilla con un refuerzo interior de madera. Sobre estas, se coloca una capa de compresión de tierra y paja o en su defecto, de cal-arena y espuma volcánica. El trabajo en conjunto de los elementos que componen el sistema se da gracias a la forma curva en la parte inferior de las piezas, que transfiere los esfuerzos del centro del claro hacia las viguetas de madera. Además, el dentado que se genera entre las piezas, permite un mayor área de apoyo, reduciendo así el fallo por cortante de las piezas o en su defecto, del refuerzo interior.



Isométrico del entepiso semi-prefabricado de pajarcilla

ELEMENTOS DEL SISTEMA

VIGUETA

Material:

Madera

Resistencia:

250kgf concentrados al centro de acuerdo con las NTC sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones en su apartado de pisos ligeros de madera.

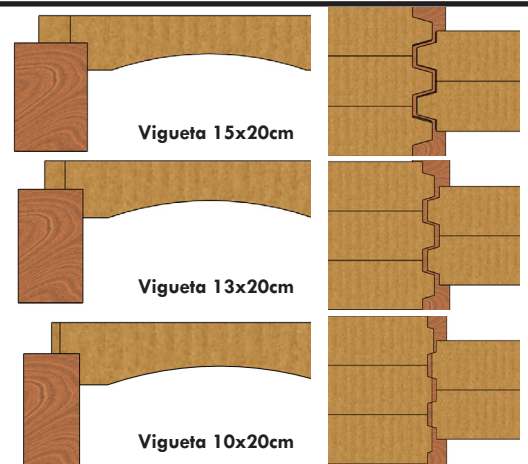
Sección de vigueta:

15x20cm

13x20cm

10x20cm

Peso: 500kg/m³



PIEZA PREFABRICADA TIPO BOVEDILLA

Material:

Pajarcilla y un refuerzo interior de madera

Resistencia:

125kgf al centro de acuerdo con la NMX-C-463-ONNCCE

Dimensiones (largo x ancho x alto):

Para viguetas 15x20: 70x15x10cm

Para viguetas 13x20: 65x15x10cm

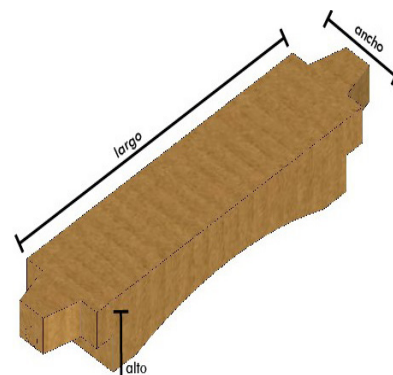
Para viguetas 10x20: 60x15x10cm

Peso

Para viguetas 15x20: 7.80kg

Para viguetas 13x20: 7.00kg

Para viguetas 10x20: 6.30kg



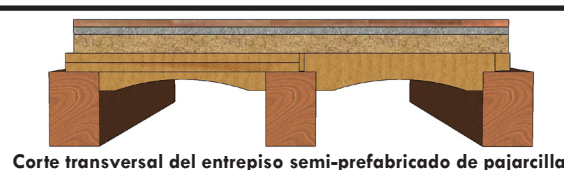
Isométrico de pieza prefabricada de pajarcilla

INFORMACIÓN TÉCNICA

Carga viva (CV): 250kg/m²

Carga muerta (CM): 147kg/m²

Carga de acabados: 60kg/m²



Corte transversal del entepiso semi-prefabricado de pajarcilla

**ANEXO 3:
CUADRO DE RENDIMIENTO**

**ENTREPISO
SEMI-PREFABRICADO
DE PAJARCILLA**



CANTIDAD

Módulo de
1.20m²

MATERIALES

- 2 Vigas de madera de 0.15x0.20x1m
- 7 botes de tierra arcillosa
- 1/2 Paca de paja de trigo de 50x30x90
- 3 Botes de agua
- 8 Redondos de madera de 7/8" 1.20m

PERSONAL



1 Oficial
albañil

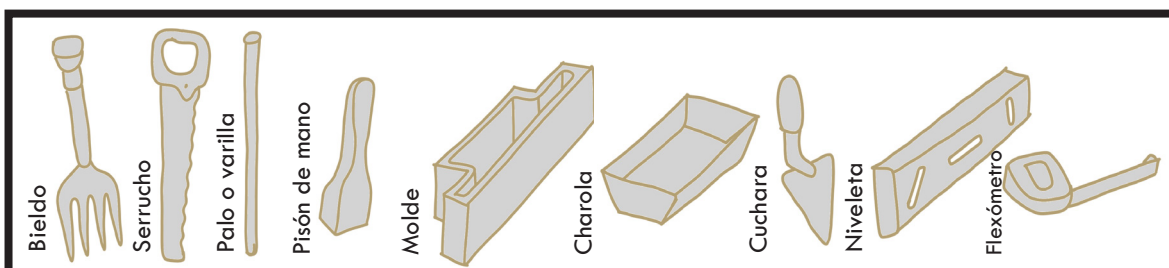
3 jornadas



1 Ayudante
albañil

3 jornadas

HERRAMIENTA



OBSERVACIONES

Se debe contemplar el tiempo de secado de las piezas prefabricadas, lo cual dependerá del lugar, tomando un promedio de 21 días.