

Estabilización de feozems para su aplicación en muros de tierra compactada Phaeozem stabilization for rammed earth wall construction

A.I. Jiménez-Sandoval ^{a,*}, A. Muciño-Vélez  ^b^a Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510, Ciudad de México, México.^b Centro de Investigaciones en Arquitectura Urbanismo y Paisaje CIAUP-UNAM, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510, Ciudad de México, México.

Resumen

La producción de materiales industrializados contribuye en gran medida al deterioro del medio ambiente. Una alternativa de menor impacto ambiental es la construcción con tapias o muros de tierra compactada, que aprovecha material de excavación comúnmente desecharido. No obstante, la implementación de estos sistemas en México se ve limitada por la falta de información sobre suelos regionales. Esta investigación busca determinar la implementación de los suelos tipo feozem del municipio de Pachuca de Soto para la elaboración de tapias, pese a su alto contenido orgánico. Así como comprobar que, al estabilizarse, se pueden obtener resistencias a la compresión suficientes para aplicarse en tapias. Se caracterizará la tierra por granulometría y límites de Atterberg, además de su estabilización con distintos aditivos, incluyendo no industrializados. Los resultados obtenidos sugieren que estos suelos una vez estabilizados con componentes no procesados adquieren resistencias a la compresión suficientes para implementarse en la fabricación de tapias.

Palabras Clave: tapia, feozem, estabilizante, mucílago, compresión.

Abstract

The production of industrialized materials greatly contributes to environmental degradation. A lower-impact alternative is construction with rammed earth walls, which makes use of excavated material that is commonly discarded as waste. However, the implementation of these systems in Mexico is limited by the lack of information on regional soils. This research aims to determine the applicability of Phaeozem-type soils from the municipality of Pachuca de Soto for the construction of rammed earth walls, despite their high organic content. The goal is to demonstrate that, when stabilized, these soils can achieve sufficient compressive strength for use in this construction system. The soil will be characterized by grain size distribution and Atterberg limits, furthermore, it will be stabilized using various additives, including non-industrial materials. Preliminary results suggest that once stabilized with unprocessed components, these soils acquire sufficient compressive strength to be used in the construction of rammed earth walls.

Keywords: rammed earth wall, phaeozem, stabilizer, mucilage, compressive strength.

1. Introducción

En años recientes distintas instituciones, entre las que encontramos a las Naciones Unidas, han impulsado iniciativas para la búsqueda de procesos de mitigación del impacto ambiental ocasionado por la producción de materiales industrializados como el ladrillo, el acero o el cemento (Naciones Unidas, 2023). Un sistema constructivo alternativo que ha tomado relevancia en años recientes son los muros de tierra compactada, o tapias, que se han aplicado de forma satisfactoria en países en desarrollo como Sri Lanka (Jayasinghe y Kamaladasa, 2006.) e India (Honne Basanna, et al. 2020) por tratarse de un material de fácil acceso, barato y

sustentable; al igual que en naciones desarrolladas como Estados Unidos, Australia y Nueva Zelanda, en la búsqueda de adaptarse a la agenda mundial de construcción sustentable (Khadka, 2020).

Este impulso por materiales alternativos se vuelve de particular interés en países como México, donde aproximadamente en el 92% de las viviendas, los muros se construyen con materiales industrializados como tabique, ladrillo, block, cemento o concreto (INEGI, 2020). Las autoridades mexicanas han identificado esta necesidad, y han desarrollado proyectos como la Taxonomía Sostenible de México, documento desarrollado mediante la colaboración de instituciones públicas y privadas donde se identifica a la

*Autor para la correspondencia: alejandroisidro.jimsan@comunidad.unam.mx

Correo electrónico: alejandroisidro.jimsan@comunidad.unam.mx (Alejandro Isidro Jiménez-Sandoval), amucino@unam.mx (Alberto Muciño-Vélez).

Historial del manuscrito: recibido el 05/08/2025, última versión-revisada recibida el 11/10/2025, aceptado el 22/10/2025, publicado el 05/12/2025. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial3.15610>



industria de la construcción como uno de los principales sectores que deben ser abordados para poder realizar la transición hacia una economía sostenible (United Nations Environment Programme, 2024).

En este contexto, los sistemas constructivos a base de tierra, como los muros de tierra compactada, se presentan como una opción que atiende a estos objetivos, al tratarse de un material natural presente en la zona de edificación o los alrededores, lo que mitiga el impacto ambiental derivado de su procesamiento y transportación, además de aprovechar tierras producto de la excavación, las cuales en su mayoría terminan desecharadas en vertederos y que llegan a representar hasta el 75% de los desechos inertes de la construcción (Morel, et al., 2021).

Sin embargo, la implementación de estos sistemas constructivos en México se ve limitada por la falta de normas especializadas, así como del estudio de suelos regionales y la aplicación de estabilizantes locales para su correcta edificación. La presente investigación tiene como objetivo comprobar que mediante la estabilización de suelos tipo feozem, así como el análisis de agregados, estabilizante, agua y tierra de la mezcla utilizada para la elaboración de muros de tierra compactada, es posible conseguir una resistencia a la compresión de mínimo 30 kg/cm² (2.94 MPa) que permita su implementación como alternativa de bajo impacto ambiental en la edificación de vivienda en Pachuca de Soto, Hidalgo.

2. Construcción con tierra

La construcción con tierra compactada existe en México desde antes incluso que la Conquista Española y fue piedra angular en la construcción de templos y pirámides como los encontrados en Tenochtitlán o Tula, si bien la implementación de encofrados se identifica como herencia europea (Baca y López, 2016). Estos encofrados son estructuras, usualmente de madera, donde se vierte la tierra en capas de 10-15 cm para posteriormente ser compactadas en niveles de 8-10 cm hasta formar el elemento arquitectónico, en este caso muros, que típicamente cuentan con grosor de 300 a 450 mm (Khadka, 2020).

Los muros de tierra compactada suelen edificarse sin refuerzo de acero, ya que esto presenta varios problemas durante la elaboración del sistema, derivado del desplazamiento del armado al momento de la compactación, o una vez construido, puesto que los elementos de acero embebidos en tierra tienden a sufrir de carbonatación y corrosión (Anysz, et al., 2020).

Para elaborar tapias, los componentes básicos necesarios son tierra y agua, aunque en años recientes las mezclas para tapias incorporan también estabilizantes para modificar las cualidades de los muros, siendo el más comúnmente utilizado el cemento portland por su mejora de la resistencia a la compresión (Ávila, et al., 2022). Esto es implementado para mitigar deficiencias del material, particularmente un deficiente comportamiento mecánico o vulnerabilidad a agentes climáticos como lluvia, viento o nieve (Baca y López, 2016).

La aplicación de estos sistemas constructivos se ven determinados por ciertos factores, entre los que encontramos la compatibilidad del tipo de suelo regional y la normativa para edificación con tierra existente en el país, que suele ser un tema variado alrededor del mundo, puesto que existe un alto grado de diversidad de un país a otro y en algunos casos no existe normatividad específica para el sistema constructivo deseado

(Cid, et al., 2011). Este es el caso de México, donde actualmente no existe una norma especializada para la construcción de muros con tierra apisonada en el formato tapial, siendo la única normativa encontrada referente a sistemas constructivos de tierra la NMX-C-508-ONNCCE-2015 para bloques de tierra compactada (BTC) estabilizados con cal.

2.1. Feozems

Durante la investigación de los tipos de tierra aptos para la construcción de tapias se identificó que, en el caso de las investigaciones que delimitan el tipo de suelo estudiado, los suelos de laterita, comunes en regiones tropicales y subtropicales que son ricos en alúmina y sesquióxidos los cuales durante su formación atraviesan un proceso de eliminación de materia orgánica, sílices, cal y otros componentes que los hace poco fértiles, tienden a ser los más comunes:

- Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material. (Kariyawasam y Jayasinghe, 2015)
- Experimental investigation on the compressive strength of cored and molded cement-stabilized rammed earth samples. (Ciancio y Gibbings, 2012)
- Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls. (Jayasinghe y Kamaladasa, 2006)

Estos suelos, sin embargo, no se encuentran presentes en la República Mexicana, como se identifica en la Fig.1, por lo que no se considera un material óptimo para su implementación en el país. Dentro de los suelos de México, destacan los leptosolos, los regosoles y, de particular interés para esta investigación, los feozems o phaeozems, siendo el tercer tipo de tierra más común en el país, representando aproximadamente 22,470,357 hectáreas de su superficie (SEMARNAT, 2020).

Los feozems son tierras oscuras con alto contenido de materia orgánica que se encuentran a 40-100 cm de profundidad y se ubican en cantidades importantes dentro de las zonas colindantes al Eje Neovolcánico, la Sierra Madre Occidental y la Península de Yucatán dentro de la República Mexicana (SEMARNAT, 2007). La alta concentración de materia orgánica de los feozems contrasta radicalmente con las características de los suelos de laterita predominantes en trabajos previos, que atraviesan un proceso de eliminación de materia orgánica durante su formación (Kumar, et al., 2022). Así mismo, dicha particularidad de los suelos feozems se ha identificado como un posible impedimento para su correcta implementación en la edificación de tapias, puesto que la materia orgánica absorbe grandes cantidades de agua, es altamente compresible y es biodegradable (Anysz, et al., 2020).

Estos suelos son especialmente comunes en el estado de Hidalgo, donde son el tipo de tierra más común y llegan a representar hasta el 81% de la superficie de su capital, Pachuca de Soto (Ayuntamiento de Pachuca de Soto, 2009).

En la literatura, si bien se sugiere que el uso de tierras oscuras no es recomendable para fabricación de muros de tierra

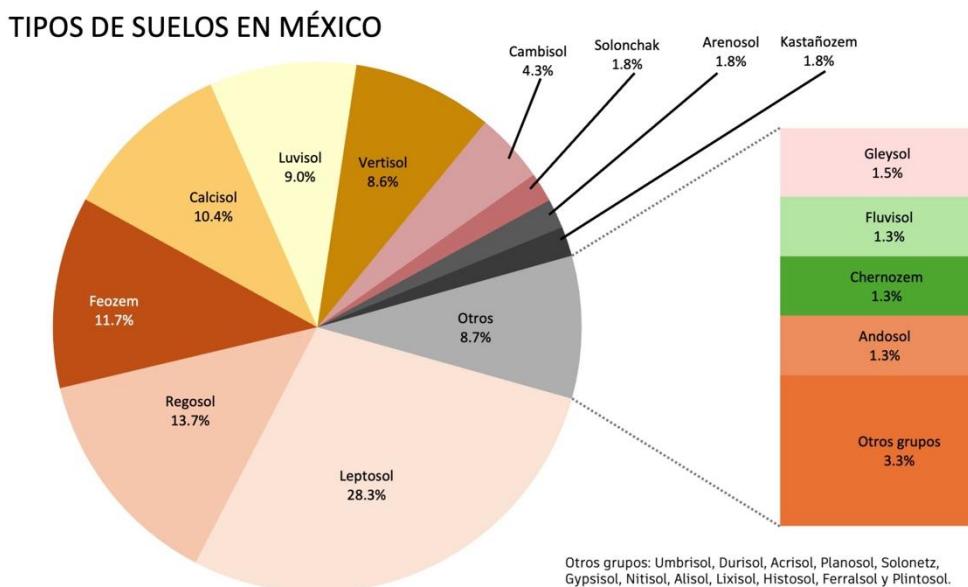


Figura 1: Porcentajes por tipos de suelo en México. Elaboración propia con datos de SEMARNAT (2007).

compactada, no se encontró una investigación que abordara la construcción con feozems o de los posibles estabilizantes que pudieran incorporarse a la mezcla para optimizar el comportamiento mecánico de los elementos fabricados con este tipo de suelo.

2.2. Estabilizantes

Puesto que la producción del cemento, estabilizante predilecto en la actualidad, representa un proceso altamente contaminante (Naciones Unidas, 2023), en años recientes se ha buscado reducir, u omitir completamente, su uso para la estabilización. La presente investigación busca identificar un estabilizante, preferentemente no industrializado, que permita obtener una óptima resistencia a la compresión con reducida o nula inclusión de cemento, por lo que se ha buscado en distintos proyectos de investigación alternativas que cumplan con dichas características, encontrando las indicadas en la Tabla 1.

En dicha tabla se enlistan distintos estabilizantes que se han aplicado en diversas regiones del mundo para disminuir o sustituir el cemento como estabilizante, buscando ilustrar la amplia variedad de estabilizantes que pueden implementarse en el sistema. Es importante mencionar, sin embargo, que la mayoría de estos no pudieron incorporarse a la presente investigación al no tratarse de materiales de fácil acceso en la zona de estudio.

Se decidió comprobar el comportamiento con algunos aditivos tradicionales como cemento o cal para comparar los obtenidos con estabilizantes no procesados que se identificó presentaron resistencias a la compresión óptimas en investigaciones previas, en este caso mucílago de nopal por tratarse de un material abundante en la zona de estudio.

De igual forma, se han realizado probetas con glicerina, material que se ha implementado previamente en repellados de tierra por sus características cohesivas e impermeabilizantes (Guerrero, et al. 2022).

Tabla 1: Estabilizantes identificados en la literatura. Elaboración propia.

Estabilizante	Descripción	Resistencia a la compresión (MPa)	Fuente
Terrazyme®	Bioenzima derivada de caña de azúcar. Micro dosis de 0.05mL/kg de tierra y 6% de cemento.	4.54 MPa	Honne Basanna, et al. 2020
Escoria de alto horno	En proporción 5% y 5% cemento	7.80 MPa	Arslan, M. et al. 2017
Puzolanas con microsílica	10% de puzolana y 1.5% de humo de sílice	2.47 MPa	Toufigh y Kianfar, 2018
Cal con puzolanas	Cal en conjunto con polvo de ladrillo triturado	2.12 MPa	Baca y López, 2016
Fibras de paja de cebada y de palmera datilera	Aplicado en porcentajes de 0.75%, con diámetro 1-3 mm y 2-3 cm de longitud.	2.98 MPa Fibras de palmera datilera: 3.44 MPa	Koutous y Hilali, 2021
Mixobacteria	Aplicación de myxococcus xanthus	2.13 MPa	Gutiérrez, 2016

Polímero de pena de tuna (nopal)	En proporción del 6% de polímero de pena de tuna.	2.36 MPa	Barrera, 2022
----------------------------------	---	----------	---------------

3. Metodología

Para determinar la factibilidad de un tipo de suelo para su implementación en la elaboración de muros de tierra apisonada hay que tener en cuenta sus características, en este ámbito entre las que se han identificado en pesquisas enfocadas en la determinación de factores relevantes del suelo para su uso en el sistema constructivo de tapial son las siguientes: textura (cantidades de arena, grava y arcilla/limo) y límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad) (Burroughs, 2010).

Así pues, el primer paso que se tomó para poder determinar la factibilidad de los feozems para su aplicación en tapias fue su caracterización conforme a sus propiedades de granulometría y Límites de Atterberg, ambos necesarios para poder categorizar el suelo dentro del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Para clasificar un suelo se utiliza el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, que delimita las siguientes características para los agregados del suelo conforme a lo indicado por las normas ASTM D2487-17 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (ASTM International, 2017) y ASTM D4318-17 Método de Ensayo Estándar para Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos (ASTM International, 2017). Los distintos agregados que componen a los suelos se delimitan de la siguiente forma:

- Grava: Partículas de piedra que pasan por un tamiz de 75 mm, retenidos en tamiz estándar americano del No.4 de 4.75 mm.
- Arena: Partículas de piedra que pasan por tamiz estándar americano del No. 4 de 4.75 mm, retenidos en tamiz estándar No. 200 de 0.075 mm.
- Limo: Suelo que pasa el tamiz americano No. 200 de 4.75 mm que no es plástico y exhibe poca o nula fuerza al ser secado al aire.
- Arcilla: Suelo que pasa por el tamiz estándar del No. 200 de 0.075 mm que exhiben plasticidad al humedecerse respecto a un rango determinado y considerable fuerza al secarse.

De igual forma, se establecen los Límites de Atterberg conforme se indica a continuación:

- Límite líquido: El contenido de agua de un suelo cohesivo en el límite entre estado semilíquido y plástico.
- Límite plástico: El contenido de agua de un suelo cohesivo en el límite entre estado plástico y semisólido.
- Índice de plasticidad: El rango de contenido de agua dentro del cual el suelo se comporta plásticamente. Es la diferencia entre el límite plástico y líquido.

Para estos procedimientos, aunado a lo establecido en las normas previamente mencionadas, se utilizó la norma complementaria ASTM C136-14 de Análisis de tamizado de

agregados finos y gruesos, misma que indica que del material estudiado se deben tamizar las gravas para posteriormente introducirse en un horno a +/-110°C hasta mantener un peso uniforme y posteriormente debe ser tamizado en una torre de tamices en orden descendente de apertura para poder ir separando por arenas gruesas, arenas medias, arenas finas y limos/arcillas; estos últimos se consideran como uno solo puesto que ambos pasan por el Tamiz No. 200, conforme a lo indicado por la norma.

La norma ASTM C117 Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve by Washing no se incluyó como parte del presente estudio ya que implica un procedimiento laborioso con múltiples etapas de agitación y decantación, mismo que al ejecutarse por personal no familiarizado con la metodología puede generar sesgos en la obtención e interpretación de resultados. En su lugar se siguieron las previsiones indicadas en la práctica análoga NMX-C-077-ONNCCE-2019 Análisis Granulométrico, la cual reconoce como práctica usual y satisfactoria el cribado en seco. Así mismo, se ejecutó un proceso de disagregación de terrones presentes en la muestra de suelo con apoyo de un martillo de goma, a fin de evitar contabilizarlos erróneamente como agregados gruesos. Se buscó considerar en todo momento la trazabilidad conforme a una normativa aplicada en la zona de estudio, en este caso se optó por la NMX-C-077-ONNCCE-2019 debido a que el feozem constituye una tierra de uso regional y el interés del estudio es generar datos con pertinencia local.

Para comprobar la efectividad de los muros de tierra apisonada estabilizada como elemento estructural un factor clave que se evalúa es su resistencia a la compresión, debido a que esta característica se considera el principal indicador para determinar la capacidad del material para soportar cargas verticales (Charef., et al, 2021), por lo que para el presente documento se reportan los resultados obtenidos del proceso de muestreo en este rubro, clarificando que se reconocen pruebas adicionales, como la prueba de resistencia a la abrasión, que pudieran incorporarse posteriormente a la investigación. Las pruebas de resistencia a la compresión del elemento se realizan mediante el uso de una máquina de pruebas universales, con piezas a escala reducida utilizando la mezcla con que se edifica o con núcleos extraídos de una sección de un muro de tierra (Ciancio y Gibbings, 2012).

Al no existir en México una norma definida para tapias, se toman de referencia los valores de resistencia a la compresión indicados por la NMX-C-508-ONNCCE-2015, siendo de 30 kg/cm² para muros no estructurales y de 60 kg/cm² para muros estructurales (Guillén, et al., 2022). Además, para poder tener un parámetro más cercano al sistema constructivo deseado, se realizó una investigación de las normas internacionales con previsiones sísmicas, encontrando la norma americana ASTM E2392 Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems, que se determinó como un referente apto al contar con suelos con características similares a los feozems encontrados en México (FAO, 2015). Esta norma, a su vez, indica que se deben realizar las pruebas de compresión conforme a lo indicado en las normas neozelandesas NZS 4297, 4298 Y 4299 (ASTM International, 2023).

Las normas NZS 4297, 4298 y 4299 son ampliamente referenciadas alrededor del mundo ya que cuentan con descripciones detalladas de las características de los



Figura 2: Diagrama del espacio experimental y los equipos. Elaboración propia.

materiales, los procesos de construcción, realización de pruebas y parámetros para el diseño estructural y de durabilidad para distintos sistemas de construcción con tierra,

dentro de las que podemos encontrar el tapial (Thompson, Augarde, y Osorio, 2022).

Así pues, en el punto en que se encuentra la investigación se han realizado probetas que han seguido algunos de los puntos delimitados por estas normas, mismos que se describen a continuación:

- Las muestras deben dejarse curar por un periodo de 28 días en un ambiente sin injerencia de fuertes vientos o lluvia. Los primeros 4 días no deben estar expuestos al sol. Los días en que la temperatura sea menor a 5°C, no deben contarse para el periodo de curado.
- Las muestras no deben cocerse en horno.
- Las muestras deben cumplir con una resistencia a la compresión de mínimo 1.3 MPa. Aunque en este caso se tomará la resistencia a la compresión mínima referida por la norma mexicana NMX-C-508-ONNCCE-2015 de 30 kg/cm² (2.94 MPa).
- Se deben realizar 5 muestras por cada tipo de mezcla utilizada conforme lo indicado en la norma neozelandesa.

De forma simultánea al proceso de caracterización de los suelos, se comenzó a realizar un muestreo con probetas preliminares para familiarizarse con los procedimientos de fabricación utilizando los porcentajes de agua sugeridos por la literatura, así como algunos estabilizantes. Estas probetas se trabajaron con dimensiones de 5x5x5 cm para mitigar la cantidad de tierra requerida durante el proceso de muestreo, utilizando series de 5, siguiendo los pasos que se describen a continuación:

- Preparación de material, se pesan la tierra, el agua y el estabilizante para asegurarse que cumplan con los

- porcentajes deseados. Se utilizó una balanza de precisión con aproximación de 0.1 g.
- Se mezclan los componentes secos y líquidos por separado, esto asegura que el material sea homogéneo y que se distribuya de forma uniforme a toda la mezcla.
- Se humedece la mezcla seca, con apoyo de un atomizador, para distribuir de forma uniforme el contenido líquido.
- Se vierte la mezcla dentro del molde. Es indispensable que el molde haya sido previamente preparado con desmoldante. Para los experimentos se ha trabajado con un molde de acero.
- Se realiza el apisonado de la tierra dentro del molde con apoyo de una Prensa Porter.
- Desmoldado, también con apoyo de la Prensa Porter, aplicando fuerzas en el lado opuesto del que se apisonó. Se empuja levemente la pieza para posteriormente terminar de desmoldar la pieza de forma manual.
- Se guardan las piezas desmoldadas en un espacio sin injerencia directa del sol durante 28 días para el proceso de curado.
- Se probó la resistencia de las probetas con apoyo de una Prensa Hidráulica.

Si bien se reconoce la existencia de un corpus normativo adicional al reportado, mismo que incluye procedimientos diversos para la ejecución de este tipo de pruebas, la investigación delimita la metodología implementada a los protocolos establecidos por las normas antes mencionadas. Esta delimitación se adopta para garantizar una coherencia metodológica y evitar inconsistencias que pudieran derivarse de la aplicación de variados marcos regulatorios de forma simultánea.

4. Resultados de caracterización

El proceso de caracterización granulométrico se realizó conforme a lo indicado en la norma ASTM C136-01 de Análisis de tamizado de agregados finos y gruesos, con el uso de una tamizadora mecánica. Se ejecutaron 12 pruebas repartidas en 2 series para poder asegurar que los resultados fuesen constantes.

Así mismo, una vez obtenidos los porcentajes de agregados del suelo se graficaron en una curva granulométrica y se compararon con la curva para tierra compactada sugerida por Hugo Houben y Hubert Guillaud en su libro *Traité de Construction en Terre* para determinar si un tipo de tierra es apto para implementarse en tapias conforme a sus propiedades granulométricas (Koutos y Hilali, 2019).

De igual forma, se consideran los porcentajes de agregados sugeridos por investigaciones previas, mismas que se refieren a entre un 10-40% de agregados finos, es decir, limos y arcillas, con un 35-65% de agregados gruesos, siendo estos arena y grava fina (Arslan, M. et al. 2017). Estos márgenes están respaldados por lo indicado en la norma de referencia ASTM E2392, misma que indica que los suelos implementados en elementos constructivos con tierra deben encontrarse dentro de la categoría de Arenas (ASTM International, 2016).

Los resultados de las pruebas se muestran en las Fig. 3 y Fig. 4, mostrando ambas series de cribado hechas con tamizadora mecánica.



Figura 3: Primera serie de muestras de cribado. Elaboración propia.

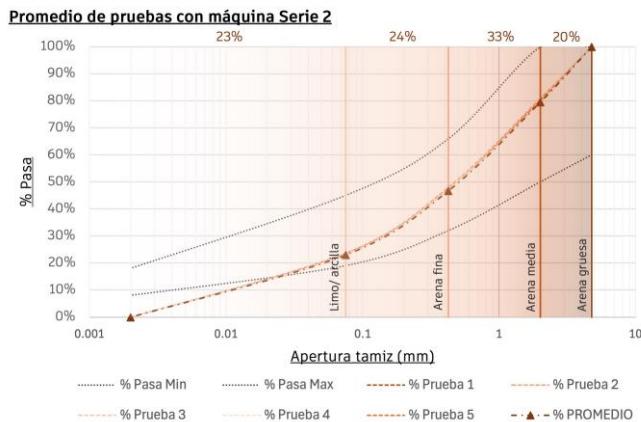


Figura 4: Segunda serie de muestras de cribado. Elaboración propia.

Las características granulométricas observadas en las muestras se analizaron conforme a lo que estipula la norma

ASTM D2487-17 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes, véase Fig. 2. Se concluye lo siguiente:

- Del material que pasó por el tamiz no. 4, aproximadamente el 77% fue retenido por los tamices del no. 10 al no. 200, lo que indica que el material entra en la categoría de ARENAS.
- Aproximadamente el 23% del material pasó por el tamiz no. 200, por lo que el material se considera como parte de las ARENAS CON FINOS.
- Al presentar un porcentaje de *limos/arcillas mayores al 5%*, es necesario realizar pruebas de Límites de Atterberg para concluir el proceso de caracterización.
- La granulometría del suelo estudiado cumple con los parámetros delimitados como óptimos para poder ser implementados en muros de tierra compactada.

En el caso de los Límites de Atterberg, las pruebas se realizaron conforme a lo delimitado en la norma ASTM D4318-17 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, en las se observó lo siguiente:

- En el caso de Límite Líquido, se obtuvo un valor de 31.29%, redondeándose al número entero más cercano que es 31, véase Figura 5.

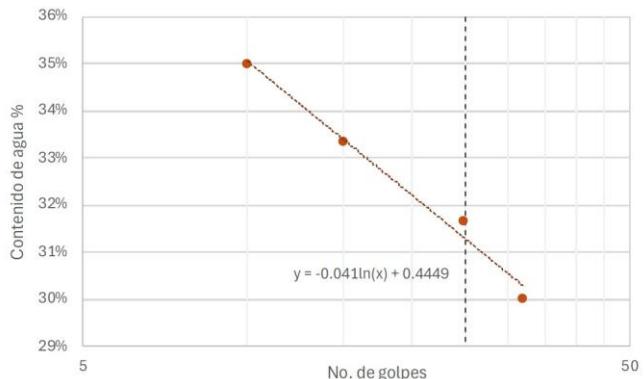


Figura 5: Gráfica de resultados de Límite Líquido. Elaboración propia.

- Para límite plástico, el promedio resultante de las pruebas fue de 23.33%, redondeándose al número entero más cercano, que en este caso es 23.
- Con estos valores se calcula el Índice de Plasticidad para la muestra de feozem, restando al Límite Líquido el Límite Plástico, arrojando una cifra de 8.
- Una vez obtenidos Límite Líquido e índice de Plasticidad, se elabora la carta de plasticidad, véase figura 6, que permite concluir la caracterización de los suelos. En el caso de la muestra analizada, al contar con un Límite Líquido de 31 y un Índice de Plasticidad de 8, se considera que el suelo entra en la categoría de CL, arcillas de baja plasticidad.
- Estos resultados concuerdan con los datos sugeridos como ideales de un suelo apto para aplicarse en muros de tierra compactada, que se establecían como aquellas que se categorizaban como arenas y contenido de limos/arcillas entre el

21-25%, así como un Índice de Plasticidad menor a 15.

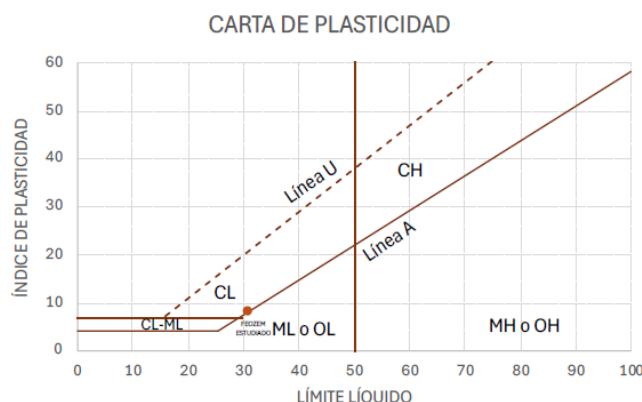


Figura 6: Carta de plasticidad para la muestra de feozem. Elaboración propia.

5. Resultados de pruebas a compresión

Se trabajó una primera serie de probetas sin la adición de estabilizantes, únicamente modificando la cantidad de agua incluida en la mezcla, para observar el comportamiento mecánico que presentan los feozems sin aditivos. Se realizó una serie de 5 probetas para dos porcentajes de agua distintos: 15 (TER15) y 20% (TER20), ambas realizadas con una fuerza de compactación de 150 kg. Los porcentajes de agua y estabilizante implementados en el diseño de mezclas de la presente investigación se obtuvieron en peso conforme a la porción seca de suelo utilizada en la mixtura.

Estas probetas demostraron un desempeño a la compresión considerablemente inferior al mínimo requerido por ambas normas de referencia utilizadas, alcanzando resistencias promedio de 0.49 MPa para la serie con 15% de agua y 0.82 MPa en la mezcla con 20%.

Posteriormente, se procedió a trabajar con distintos estabilizantes en probetas individuales. Esta serie incluyó 2 probetas de cemento, al ser el más comúnmente aplicado en la industria; una probeta sin estabilizante para determinar si los feozems pueden obtener resistencias óptimas a la compresión sin estabilización al ser sometida a una mayor presión de compactación; y dos probetas estabilizadas con mucílago de nopal en proporciones de 15 y 20% respectivamente.

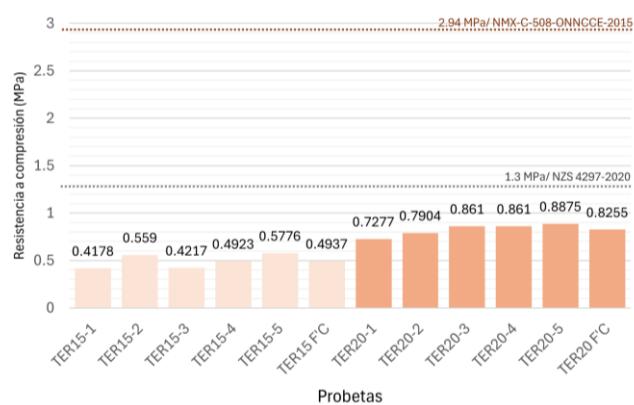


Figura 7: Gráfica de resultados de ensayo a compresión sin estabilización. Elaboración propia.

Aunque el objetivo principal de esta investigación es la identificación y evaluación de la resistencia a la compresión de estabilizantes alternativos para suelos tipo feozem que permita sustituir el uso de cemento, se decidió incorporarlo como material de referencia durante la fase de muestreo. Esta aproximación brinda un parámetro de referencia del feozem cuando es tratado con un agente convencional en comparación con su comportamiento mecánico al estabilizarse con materiales alternativos, permitiendo evaluar su potencial como sustitutos sostenibles al cemento.

En el caso de la aplicación de mucílago de nopal, este se extrae de muestras de la especie *Opuntia ficus-indica*. Así mismo, se declara que se trabajó con baba de nopal, empleando en este documento el término “mucílago de nopal” para referirse al aditivo, ya que ambas denominaciones se utilizan comúnmente de manera indistinta en la industria (Soria, et al., 2015).

Las características de las mezclas utilizadas en esta primera serie se indican en la Tabla 2, mientras que los resultados obtenidos se ilustran en la Fig. 7, de los que se obtuvieron las siguientes observaciones:

- Se puede utilizar la tierra sin estabilizante para obtener resistencia a la compresión por encima de la norma neozelandesa si es que se puede garantizar una mayor fuerza de compactación, factor que resulta complicado al fabricar las piezas in situ.
- Contrario a lo indicado por la literatura, la estabilización con cemento agregado en seco presenta menores resistencias a la compresión que la tierra sin estabilizante compactado a mayor presión. Así mismo, su resistencia es superior a lo requerido por la norma neozelandesa, no así con la norma mexicana.
- El mucílago de nopal con reducida fuerza de compactación alcanza mayores resistencias a la compresión que la obtenida con cemento. Es de notar también que la adición de un mayor porcentaje de agua mejora los resultados.

Tabla 2: Estabilizantes identificados en la literatura. Elaboración propia.

Nombre	% de agua	Est.	% de est.	Presión (kg)	F'c (MPa)
Ter-1	10	-	-	350	1.9192
Cem-1	10	Cemento	8	350	1.7475
Cem-2	10	Cemento	8	150	1.768
Nop-1	10	Mucílago de nopal	6	150	2.4095
Nop-2	15	Mucílago de nopal	6	150	2.8361

Derivado de esta prueba, se decidió elaborar una serie con los valores de agua y estabilizante de la probeta NOP-2, que obtuvo el valor más alto de resistencia a la compresión. De forma simultánea, se desarrollaron otras dos series estabilizadas con glicerina y con cal, ambas con el 15% de agua y 6% de estabilizante, para poder compararlo con la serie

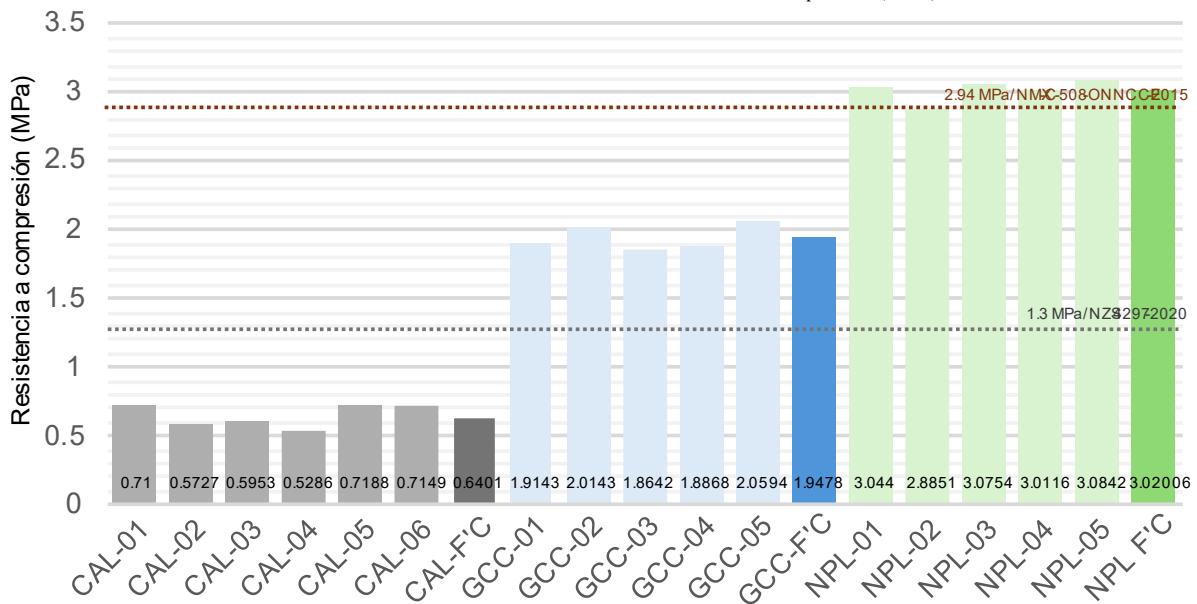


Figura 9: Gráfica de resultados de ensayo a compresión para probetas estabilizadas con cal, glicerina y mucílago de nopal. Elaboración propia.

estabilizada con mucílago. Nuevamente estas series utilizaron una fuerza de compactación de 150 kg.

Las series recibieron las siguientes clasificaciones:

- NPL: Mucílago de nopal
- GCC: Glicerol/ glicerina
- CAL: Cal hidratada
- F'C: Promedio de cada una de las series

De estas últimas 3 series de probetas elaboradas se obtuvieron las siguientes observaciones:

- La estabilización de feozems con cal decrementa el comportamiento de las piezas a la compresión de forma radical, estando considerablemente por debajo de lo requerido por ambas normas referenciadas
- El glicerol como estabilizante presenta resultados por encima de los requeridos por la norma extranjera de referencia. Similares a las obtenidas sin estabilizar, pero requiriendo menor fuerza de compactación.
- La estabilización con mucílago de nopal mejora considerablemente la resistencia a la compresión de las piezas. Los resultados obtenidos de la segunda serie no solo igualaron los reportados previamente en la probeta NOP-2, sino que sobre pasaron lo requerido por ambas normas referenciadas.

práctica, el cemento o la cal, obtuvieron resistencias por debajo de estabilizantes de menor uso como el mucílago de nopal o la glicerina. En el caso de la cal, la mejora en el comportamiento mecánico fue mínima, con valores comparables a los presentados por el suelo sin estabilizar. De entre los distintos estabilizantes, aquel que destacó por obtener una resistencia a la compresión considerablemente mayor a los demás fue el mucílago de nopal, cuya resistencia cumplió con ambas normas de referencia, superando los 3 MPa.

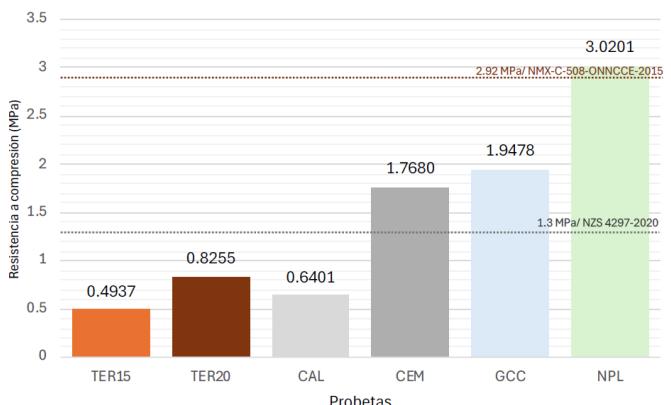


Figura 10: Comparativa de resultados obtenidos por los estabilizantes aplicados en la investigación. Elaboración propia.

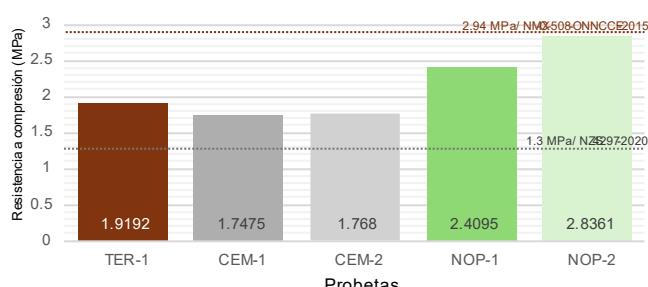


Figura 8: Gráfica de resultados de ensayo a compresión para primera serie probetas estabilizadas. Elaboración propia.

Al realizar una comparativa de los distintos estabilizantes utilizados en la investigación se identifica que aquellos que son más propagados en previas investigaciones y dentro de la

Aunque las probetas estabilizadas con mucílago de nopal alcanzaron en promedio una resistencia a la compresión satisfactoria, los valores obtenidos por la serie de probetas se encontraron con un rango reducido por encima del mínimo permitido por la norma mexicana de referencia y en el caso de la probeta NPL-02 incluso se reportó una resistencia por debajo de los 2.94 MPa deseados. Con esto en mente, se considera que el mucílago de nopal es un estabilizante adecuado para aplicarse en suelos tipo feozem, adquiriendo resistencias adecuadas para tapias no estructurales, siendo una alternativa sostenible al cemento comúnmente utilizado en la industria. Así mismo, se abre el camino para otros estabilizantes no procesados de reducido impacto ambiental que también pudiesen ser incorporados a la mezcla.

No obstante, el diseño de mezclas puede optimizarse para mejorar el comportamiento mecánico de la tapia y que este supere holgadamente el requerido por la normativa, permitiendo un mayor factor de seguridad y margen de tolerancia para las variaciones inherentes a los procesos de construcción que pudieran suscitarse al momento de la puesta en obra.

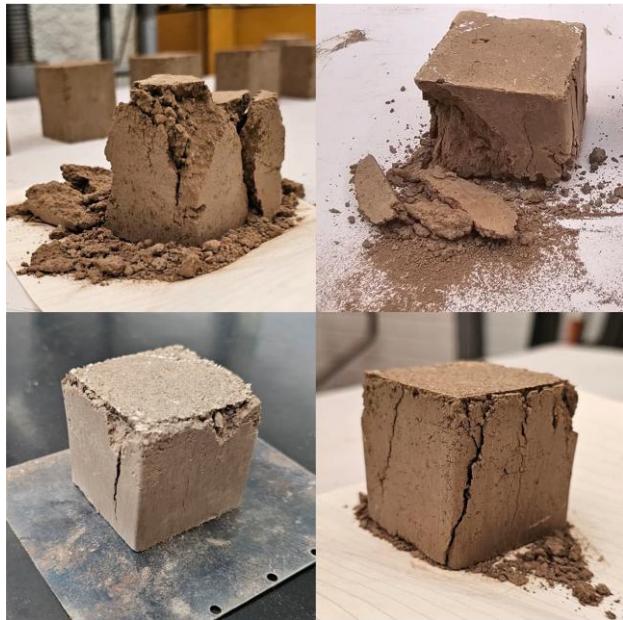


Figura 11: Empezando en la esquina superior izquierda y en orden dextrorso, probetas de feozem sin estabilizar, estabilizado con cemento, baba de nopal y glicerina posterior al ensayo a compresión. Elaboración propia.

6. Conclusiones

Se observó que los suelos feozem de Pachuca de Soto poseen un comportamiento granulométrico dentro de los rangos definidos como óptimos para su aplicación en muros de tierra compactada, siendo mayormente arenas y presentando un porcentaje promedio del 23% de limos y arcillas. Esta característica hace innecesaria la realización de un proceso de reconstitución del suelo, que es la adición de material inerte como arena de río o arcilla para que la granulometría del suelo trabajado se asemeje más a lo sugerido por la literatura como óptimo. Además, lo observado en el análisis de Límites de Atterberg indica que también cuenta con un índice de Plasticidad dentro de los rangos idóneos para construcción de muros de tierra compactada. Así pues, se puede determinar que los feozems del municipio de Pachuca de Soto son ARENAS CON FINOS, resaltando que poseen un Índice de Plasticidad del 8%, siendo suelos aptos para su estabilización y aplicación en tapias.

Por otra parte, contrario a lo sugerido en estudios previos, se han obtenido resistencias a la compresión en la mayoría de los casos superiores a los 1.3 MPa requeridos por la norma NZS 4297. La excepción siendo las probetas elaboradas con cal, cuyas resistencias fueron inferiores a las requeridas por la norma extranjera y que se mantienen similares a las obtenidas por las probetas de tierra sin estabilizar. Resalta el comportamiento obtenido por las probetas estabilizadas con mucílago de nopal, cuyos valores de resistencia a la compresión superaron tanto la norma neozelandesa como la norma mexicana NMX-C-508-ONNCCE-2015 que exige un

mínimo de 2.94 MPa, obteniendo en promedio una resistencia de 3.02 MPa.

Es importante resaltar que los feozems presentaron menores resistencias a la compresión cuando fueron estabilizados con elementos procesados como cemento, mientras que su comportamiento al estabilizarse con materiales naturales, el mucílago de nopal, su resistencia incrementó en al menos 1 MPa. Esta observación es importante, ya que al ser suelos con alto contenido orgánico sus métodos de estabilización tienen a ser incompatibles con los que se suelen implementar en la industria, sin embargo, abre al panorama para la búsqueda que estabilizantes no procesados que posibilitarían el uso de suelos orgánicos en la construcción.

Es necesario realizar las probetas finales con las medidas requeridas por las normas referenciadas para obtener un resultado definitivo, no obstante, se concluye de forma preliminar que los feozems pueden ser implementados en un sistema de muros de tierra compactada o tapias, especialmente al ser estabilizados con mucílago de nopal, ya que son capaces de alcanzar valores de resistencia a la compresión por encima de las normas extranjeras de referencia y las regionales para sistemas constructivos con tierra.

Referencias

- Anysz, H., Brzozowski, L., Kretowicz, W. y Narloch, P., (2020). Feature importance of stabilized rammed earth components affecting the compressive strength calculated with explainable artificial intelligence tools. *Materials*, 13(10), 2317.
DOI:10.3390/ma13102317
- Arslan, M. E., Emiroğlu, M. y Yalama, A., (2017). Structural behavior of rammed earth walls under lateral cyclic loading: A comparative experimental study. *Construction and Building Materials*, 133, 433–442.
DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.093
- ASTM International, (2014). ASTM C136/C136M-14 Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. ASTM International, West Conshohocken, PA.
DOI: 10.1520/C0136_C0136M-14
- ASTM International, (2016). ASTM E2392/E2392M-10(2016) Standard guide for design of earthen wall building systems. ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/E2392_E2392M-10R16
- ASTM International, (2017a). ASTM D2487-17 Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D2487-17
- ASTM International, (2017b). ASTM D4318-17 Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D4318-17
- Avila, F., Puertas, E. y Gallego, R., (2022). Characterization of the mechanical and physical properties of stabilized rammed earth: A review. *Construction and Building Materials*, 325, 126693.
DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126693
- Ayuntamiento de Pachuca de Soto, (2009). Programa Municipal de Desarrollo Urbano de Pachuca de Soto Estado de Hidalgo. Ayuntamiento de Pachuca de Soto, Pachuca de Soto. Recuperado de: https://web.archive.org/web/20160304112229/http://imip.pachuca.gob.mx/programas/PMDU_PACHUCA.pdf
- Baca, L. F. G. y López, F. J. S., (2014). Estabilización de suelos con cal y puzolanas. In: Construcción con tierra. pp. 15–24.
- Barrera, J. E. C., (2022). Uso de biopolímeros en la prefabricación de muros de tapia. *Quaderns d'estructures: Dijous a l'ACE*, (75), 29–36.
- Burroughs, S., (2008). Soil property criteria for rammed earth stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(3), 264–273.
DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:3(264)
- Burroughs, S., (2010). Recommendations for the selection, stabilization, and compaction of soil for rammed earth wall construction. *Journal of Green Building*, 5(1), 101–114.
DOI: 10.3992/jgb.5.1.101
- Ciancio, D. y Gibbons, J., (2012). Experimental investigation on the compressive strength of cored and molded cement-stabilized rammed

- earth samples. *Construction and Building Materials*, 28(1), 294–304. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.070
- Cid, J., Mazarrón, F. R. y Cañas, I., (2011). Las normativas de construcción con tierra en el mundo. *Informes de la Construcción*, 63(523), 159–169. DOI: 10.3989/ic.10.011
- Comisión Nacional de Vivienda, (2022). Rezago habitacional. Recuperado de: <https://siesco.conavi.gob.mx/siesco/rezago.aspx>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, (2015). Status of the world's soil resources. FAO. Recuperado de: <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>
- Guillén Guillén, C. A., Muciño Vélez, A., Guerrero Baca, L. F. y Cruz Farrera, F. J., (2021). Optimización del proceso de elaboración de Bloques de Tierra Comprimida (BTC) mediante el control granulométrico de las partículas del suelo. *Nova Scientia*, 13(27). DOI: 10.21640/ns.v13i27.2891
- Gutiérrez Salgado, J. J., (2016). [Tapia] estabilización microbiológica una forma de autoconstrucción. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Honne Basanna, N., Hirebelaguly Shivaprakash, S., Bhimahalli, A., Parameshwarappa, P. K. y Gaudin, J., (2020). Role of stabilizers and gradation of soil in rammed earth construction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5), 04020072. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003112
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (2020). Viviendas. INEGI. Recuperado de: <https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/vivienda.aspx>.
- Jayasinghe, C. y Kamaladasa, N., (2007). Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls. *Construction and Building Materials*, 21(11), 1971–1976. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.049
- Kariyawasam, K. K. G. K. D. y Jayasinghe, C., (2016). Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material. *Construction and Building Materials*, 105, 519–527. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.189
- Khadka, B., (2020). Rammed earth, as a sustainable and structurally safe green building: A housing solution in the era of global warming and climate change. *Asian Journal of Civil Engineering*, 21(1), 119–136. DOI: 10.1007/s42107-019-00202-5
- Koutous, A. y Hilali, E. M., (2019). A proposed experimental method for the preparation of rammed earth material. *International Journal of Engineering and Technology Research*, 8, 345–354. DOI: 10.17577/IJERTV8IS070140
- Kumar, G. S., Saini, P. K., Deoliya, R., Mishra, A. K. y Negi, S. K., (2022). Characterization of laterite soil and its use in construction applications: A review. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 16, 200120. DOI: 10.1016/j.rcradv.2022.200120
- Morel, J. C., Charef, R., Hamard, E., Fabbri, A., Beckett, C. y Bui, Q. B., (2021). Earth as construction material in the circular economy context: Practitioner perspectives on barriers to overcome. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376(1834), 20200182. DOI: 10.1098/rstb.2020.0182
- Naciones Unidas, (2023). Plan de las Naciones Unidas promete enormes reducciones de emisiones en el sector de la construcción, el más contaminante y difícil de.... Naciones Unidas. Recuperado de: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/plan-de-las-naciones-unidas-promete-enormes-reducciones>
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., (2019). NMX-C-077-ONNCCE-2019 Industria de la construcción-Agregados para concreto-Análisis granulométrico-Método de ensayo. ONNCCE, Ciudad de México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), (2007). Suelos. SEMARNAT. Recuperado de: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelo_s.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), (2020). Superficie de grupos de suelos dominantes, 2006. SEMARNAT. Recuperado de: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2020/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServletc755.html.
- Soria, P. T., Flores, S. C., Pelaéz, N. C. P., Mendiola, S. E. F., Ibarra, M. A. R. y Becerril, A. C., (2015). La baba y el mucílago de nopal, una alternativa natural para la conservación de acabados arquitectónicos de tierra. *Antropología. Revista interdisciplinaria del INAH*, (99), 92–114.
- Standards New Zealand, (2020a). NZS 4297 (2020): Engineering design of earth buildings. Standards New Zealand, Wellington.
- Standards New Zealand, (2020b). NZS 4298 (2020): Materials and workmanship for earth buildings. Standards New Zealand, Wellington.
- Thompson, D., Augarde, C. y Osorio, J. P., (2022). A review of current construction guidelines to inform the design of rammed earth houses in seismically active zones. *Journal of Building Engineering*, 54, 104666. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104666
- Toufigh, V. y Kianfar, E., (2019). The effects of stabilizers on the thermal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts. *Construction and Building Materials*, 200, 616–629. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.050
- United Nations Environment Programme, (2024). Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector. Nairobi. DOI: 10.59117/20.500.11822/45095