

Modificaciones de la envolvente de falla en suelos arcillosos con distintos estabilizadores volumétricos

A. Sánchez¹ , E. Alonso^{1,2*} , W. Martínez² , H. Chávez² , M. Navarrete² ,
M. Arreola² , J. Borrego² , L. Equihua² , E. Núñez² , O. Miranda²

*Autor de Contacto: elia.alonso@umich.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.595>

Recepción: 01/03/2022 | Aceptación: 19/04/2022 | Publicación: 01/05/2022

RESUMEN

Se analizaron modificaciones presentadas por distintos estabilizadores (cal, cemento, fibra de nopal, líticos de río, líticos volcánicos, sulfato de sodio y yeso) en propiedades y envolvente de falla de un suelo arcilloso natural remoldeado de Santiago Undameo, en Michoacán, México. Al suelo arcilloso se le realizó granulometría, hidrometría, pruebas índice, compresión simple y prueba Proctor; a las mezclas estabilizadas se determinó la variación en propiedades índice y envolvente de falla. Las adiciones propuestas mejoraron el comportamiento del suelo altamente plástico, disminuyendo las deformaciones volumétricas e incrementando su resistencia mecánica normal, al cortante y ángulo de fricción interna. La investigación contribuye favorablemente a la restauración de construcciones de tierra histórico-patrimoniales, obra civil, patologías en edificaciones y tecnologías constructivas. La investigación fue realizada en laboratorio bajo normatividad internacional.

Palabras clave: estabilización de suelos; propiedades mecánicas; cortante; cohesión; ángulo de fricción interna; restauración.

Citar como: Sánchez, A., Alonso, E., Martínez, W., Chávez, H., Navarrete, M., Arreola, M., Borrego, J., Equihua, L., Núñez, E., Miranda, O. (2022), “*Modificaciones de la envolvente de falla en suelos arcillosos con distintos estabilizadores volumétricos*”, Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 227 – 247, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.595>

¹ Faculty of Architecture, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mexico

² Materials Department, Faculty of Civil Engineering, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mexico

Contribución de cada autor

En este trabajo la experimentación fue llevada a cabo por O. Miranda (50%), L. Equihua (25%), E. Nuñez (25%); la actividad de búsqueda bibliográfica O. Miranda (25%), L. Equihua (25%), A. Sanchez (25%) y E. Alonso (25%); la actividad de extracción de información por E. Nuñez (20%), J. Borrego (20%), A. Sanchez (20%), E. Alonso (20%), W. Martinez (20%); análisis y discusión de resultados por M. Navarrete (25%), M. Arreola (25%), J. Borrego (25%), H. Chavez (25%); la redacción del documento por A. Sanchez (20%), H. Chavez (20%), W. Martinez (20%), M. Navarrete (20%) y M. Arreola (20%); la revisión del texto por E. Alonso (20%), H. Chavez (20%), M. Arreola (20%), M. Navarrete (20%) y J. Borrego (20%); el diseño de figuras y la adaptación al formato por W. Martinez (25%), L. Equihua (25%), E. Nuñez (25%) y O. Miranda (25%); traducción al inglés A. Sanchez (100%).

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2023 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2022.

Modifications of the rupture envelope in clayey soils with different volumetric stabilizer

ABSTRACT

The modifications of seven different stabilizers (lime, cement, nopal fibers, river sand, volcanic sand, sodium sulphate and gypsum) on a clayey soil of Santiago Undameo, in Michoacan, Mexico, were analyzed to observe the changes in the properties and the rupture envelope. Sieve analysis, hydraulic sedimentation, index properties, compressive strength and Proctor were performed to the natural soil; while the variation of the index properties and the rupture envelope were determined for the stabilized mixtures. The additions improved the behavior of the high plasticity soil, diminishing the volumetric deformations and increasing the mechanical resistance, shear strength and angle of internal friction. This research contributes positively to the restoration of earthen heritage buildings, civil works, construction pathologies and construction technologies. The research was performed in the laboratory under international standards.

Keywords: soil stabilization; mechanical properties; shear strength; cutting; cohesion; angle of internal friction; restoration.

Modificações do envelope de ruptura em solos argilosos com diferentes estabilizadores volumétricos

RESUMO

Foram analisadas as modificações apresentadas por diferentes estabilizantes (cal, cimento, fibra de figueira-da-índia (palma), líticas fluviais, líticas vulcânicas, sulfato de sódio e gesso) nas propriedades e envoltório de ruptura de um solo argiloso natural remodelado de Santiago Undameo, em Michoacán, México. Granulometria, hidrometria, testes de índice, compressão simples e teste de Proctor foram realizados no solo argiloso. A variação nas propriedades de índice e envoltório de ruptura foram determinadas para as misturas estabilizadas. As adições propostas melhoraram o comportamento do solo altamente plástico, reduzindo deformações volumétricas e aumentando sua resistência mecânica normal, resistência ao cisalhamento e ângulo de atrito interno. A pesquisa contribui favoravelmente para a restauração de construções de terra do patrimônio histórico, obras civis, patologias em edifícios e tecnologias de construção. A pesquisa foi realizada em laboratório utilizando normas internacionais.

Palavras-chave: estabilização do solo; propriedades mecânicas; resistência ao cisalhamento; coesão; ângulo de atrito interno; restauração.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

Listado de acrónimos (por orden de aparición en el texto)

Acrónimo	Significado
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
BTC	Bloque de Tierra Comprimida
UU	No Consolidado no Drenado
MT	Muestra Testigo
C	Cal
CP	Cemento Portland
FN	Fibras de Nopal
LR	Líticos de Río
LV	Líticos Volcánicos
SS	Sulfato de Sodio
Y	Yeso
UMSNH	Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
A	Actividad
IP	Índice Plástico
LL	Límite Líquido
LP	Límite Plástico
C _{Lin}	Contracción Lineal
C _{Vol}	Contracción Volumétrica
CH	Arcillas de Alta Plasticidad
CL	Arcillas de Baja Plasticidad
MH	Limo de Alta Plasticidad
ML	Limo
OH	Arcilla Orgánica
OL	Limo Orgánico

1. INTRODUCCIÓN

Los suelos arcillosos, también denominados arcillas, son empleados para muchas aplicaciones, entre ellas como material de construcción, y son elementos esenciales para nuestra sociedad desde las primeras etapas de la civilización hasta nuestra época moderna. Diferentes elementos constructivos como el adobe han sido empleados en culturas y lugares muy diversos, como es el caso del continente europeo y el americano, con ejemplos de una antigüedad excepcional (Mauricio, et al., 2021). Podemos encontrar importantes ejemplos del uso de suelos como elementos impermeables en núcleos de presas y cuerpos de agua para la agricultura y para riego, fabricación de cemento Portland, construcción de vías terrestres y carreteras, para elaborar piezas y componentes cerámicos, en la arquitectura vernácula y de tierra, como elementos para restauración de estructuras históricas e inmuebles patrimoniales, para humedales, limpieza y tratamiento de agua.

Debido a su fácil accesibilidad y abundancia del material en muchas y variadas regiones del planeta, los suelos arcillosos cuentan con una excelente apreciación debido a sus propiedades sostenibles y al bajo impacto energético y medioambiental que generan (Costa et al., 2019). Las arcillas son por definición sedimentos minerales constituidos principalmente por agregados de silicatos de aluminio hidratados y granulometría finamente dividida. Adicionalmente, las arcillas cuentan con excelentes propiedades aglutinantes, motivo por el que históricamente han sido utilizadas como materiales cementantes (Sanchez-Calvillo, et al., 2021).

En México, existen diferentes tipos de arcillas las cuales se han utilizado para la construcción a lo largo de tiempo; en especial, en el estado de Michoacán, encontramos la presencia de arcillas en componentes de construcción tales como mampostería de adobe, ladrillos cerámicos, morteros de unión y aplanados de tierra, entre muchos otros. Santiago Undameo, población localizada al nor-oriental del estado de Michoacán cuenta con uno de los bancos de arcilla más importantes de la región debido a la cercanía con la capital del estado, Morelia, (Ver Figura 1) cuyo centro histórico está inscrito en la lista de sitios de Patrimonio Cultural de la Humanidad de la UNESCO, y cuenta con más de 1000 inmuebles con carácter patrimonial, todos ellos construidos con técnicas de edificación tradicionales y coloniales, con un uso extendido de los suelos arcillosos y otros materiales locales de la región.



Figura 1. (a) Localización del estado de Michoacán dentro de México; (b) Localización del municipio de Morelia, incluyendo Santiago Undameo, dentro del estado de Michoacán.

Los suelos provenientes de esta localidad cuentan con una proporción de material arcilloso, que por sus propiedades de alta plasticidad presentan inestabilidad provocando cambios volumétricos considerables en contacto con el agua, lo cual suele provocar patologías en edificaciones y obra civil. Históricamente, gran variedad de materiales han sido usados como estabilizantes de las

arcillas, para disminuir la alta plasticidad higroscópica que éstas presentan, y consecuentemente reducir la retracción y la expansión lineal y volumétrica en contacto con el agua (Daneels et al., 2020). Esta estabilización es esencial para ámbitos como la arquitectura y construcción con tierra, las bases y subbases de pavimentos flexibles; ya que ayuda a incrementar la durabilidad de estas estructuras a medida que aumentan las resistencias mecánicas (Laborel-Préneron et al., 2021), siendo todas estas propiedades muy apreciadas en el sector de la construcción.

El interés de la presente investigación subyace en la complejidad de los suelos analizados en Santiago Undameo, ya que (históricamente) éstos han presentado una alta plasticidad y consecuentemente deformaciones volumétricas considerables que provocan una afectación en la estabilidad de las construcciones existentes en la región de estudio.

Por otra parte, la arquitectura de tierra en el estado de Michoacán y en general en México, pese a su riqueza, variedad e importancia cultural, ha sido desplazada y abandonada, por lo que es esencial aumentar los trabajos de investigación sobre este recurso sostenible y de fácil acceso a las comunidades. Además, entender el comportamiento de estos suelos arcillosos en combinación con distintos estabilizantes ayudará a mejorar el trabajo de intervención, restauración y comprensión de las patologías existentes.

Existen muchos materiales que se usan como estabilizadores de arcillas para la construcción, muchos de ellos con antecedentes en estudios científicos: cal (Taallah y Guettala, 2016; Navarro Mendoza et. al., 2019), cemento portland (Dao et al., 2018; Jitha et. al., 2020), fibra deshidratada pulverizada de cactus opuntia ficus indica (Ige y Danso, 2020; Li Piani, 2020), lútics de río, lútics volcánicos, sulfato de sodio, y yeso (sulfato de calcio hemihidratado) (Martínez, et al., 2018).

Las estabilizaciones con cemento, cal y soluciones alcalinas son las más comunes a nivel global (Abhilash, et al., 2022), además, en otras investigaciones se han empleado cenizas de bagazo de caña de azúcar como una alternativa en el mejoramiento de los suelos en sus características físicas como el confinamiento, densificación y estabilidad volumétrica, y químicas a través de las reacciones del agente estabilizador (cemento o cal) con el agua (Moraes et al., 2015; Ojeda Farías et al., 2018).

Podemos encontrar una abundante bibliografía acerca del uso de fibras y materiales vegetales, su principal uso siempre ha sido evitar la retracción y fisuración de elementos compactos de edificación, como los adobes, ayudando a mejorar sus capacidades mecánicas (Yetgin, et al., 2008), encontrando varias investigaciones relevantes que lograron mejorar las propiedades de la mampostería (Sharma, et al., 2015; Araya-Letelier, et al., 2021). Sin embargo, actualmente el desarrollo de técnicas mejoradas de construcción en tierra, como es el BTC ha permitido buscar soluciones incluyendo fibras de muy distintos orígenes en combinación con otros estabilizantes como CP o C (Nagaraj, et al., 2014; Taallah y Guettala, 2016; Navarro Mendoza, et al., 2019).

En México, el uso de los productos derivados del cactus opuntia ficus indica, popularmente conocido como nopal, es muy común en la construcción, tanto en forma de mucílagos como de fibras. Una de las formas más frecuentes en la región de utilizar el mucílago es hirviendo la cactácea y adicionando el líquido a las mezclas de morteros, siendo una solución recomendada por las instituciones reguladoras del patrimonio para intervenir y restaurar edificios históricos; con este método se han monitoreado incrementos en la resistencia mecánica y alta trabajabilidad de las mezclas (Martínez et al., 2008). Además, estudios correlativos con otras adiciones y estabilizantes de uso histórico han mostrado un mejor comportamiento mecánico en materiales con la adición del mucílago (Alonso et al., 2002).

En este estudio se utilizaron siete materiales estabilizadores para mejorar el comportamiento de la arcilla de Santiago Undameo en una muestra testigo (MT). Se utilizó cal (C), cemento portland (CP), fibra deshidratada pulverizada de nopal cactus opuntia ficus indica (FN), lútics de río (LR), lútics volcánicos (LV), sulfato de sodio (SS), y yeso (Y) (sulfato de calcio hemihidratado). Para medir los cambios generados en el material analizado se realizaron ensayos triaxiales no

consolidados no drenados (UU), hidrometría, granulometría y prueba Proctor tanto para las muestras testigo, como en mezclas mejoradas. El análisis a las muestras adicionadas con diferentes materiales estabilizadores proporcionará información relevante que coadyuve al mejoramiento en las técnicas y utilización de la arcilla como elemento de construcción en obras de carácter moderno y conservación del patrimonio edificado.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Las muestras de suelo se obtuvieron del banco de arcilla de Santiago Undameo, localidad muy cercana a la ciudad de Morelia, capital del estado de Michoacán, en México. El banco está localizado en 19°42' latitud norte y 101°11.4' longitud oeste, en la riberas de la presa de Cointzio (ver Figura 2), donde se producen adobes y ladrillos de arcilla recocida hechos a mano (ver Figura 3), que dan lugar principalmente a la vivienda rural de las comunidades cercanas. Después de muestrear y tomar los especímenes de suelos, estos fueron transportados al laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH, donde se llevó a cabo la presente investigación.



Figura 2. Ubicación del banco de material en Santiago Undameo (Fuente: Google Earth, 2022).

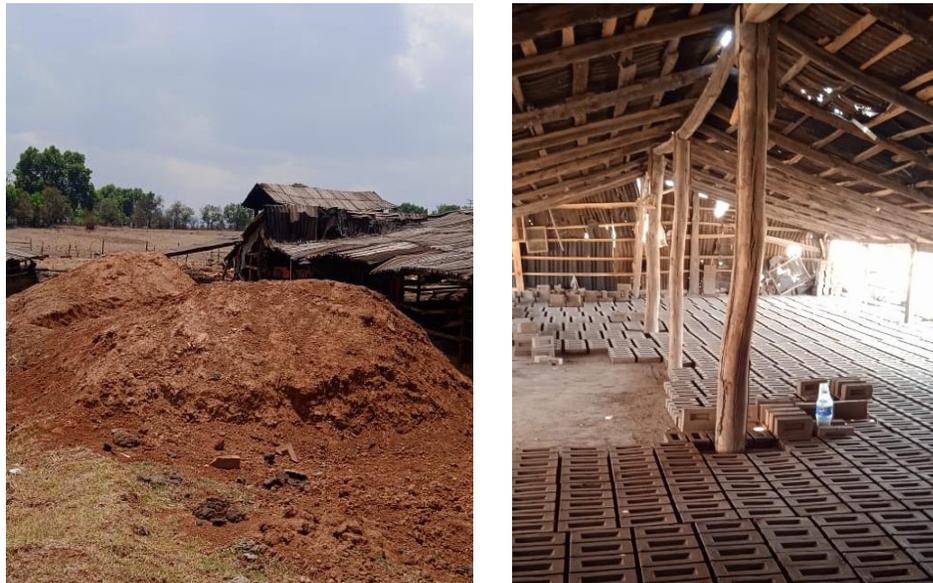


Figura 3. (a) Banco de suelo arcilloso precursor de Santiago Undameo; (b) Producción y elaboración de componentes de construcción.

Todos los ensayos propuestos en el presente documento se realizaron por triplicado. Las pruebas se realizaron tanto al suelo testigo como posteriormente a los suelos estabilizados. En la Tabla 1 pueden observarse los estabilizadores empleados, así como el porcentaje en peso utilizado para las mezclas diseñadas.

Respecto a los líticos, el LR proviene del banco “El Cuervo” en la localidad de Huajúbaro, México, coordenadas; longitud (dec): 100.742500, latitud (dec): 19.403333 y 1800 msnm, siendo áridos silíceos de morfología redondeada; mientras que el material LV proviene del banco “Joyitas”, también localizado en el estado de Michoacán, coordenadas; longitud (dec): 101.380000, latitud (dec): 19.730000 y 2082 msnm, carretera Morelia-Quiroga, siendo áridos andesíticos con forma irregular.

Es importante destacar que en estudios previos se realizó un barrido con cada una de las adiciones con porcentajes de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10% en peso del suelo (Flores Rentería, 2010), para encontrar los contenidos óptimos de cada estabilizante, concluyéndose que los mejores comportamientos mecánicos fueron los indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Porcentajes de los Estabilizadores en peso.

Estabilizadores	% Estabilizante
C	3.0
CP	3.0
FN	0.5
LR	10.0
LV	10.0
SS	0.5
Y	6.0

En la presente investigación se realizaron varias pruebas y ensayos para la caracterización de los suelos, que aparecen representados en la Tabla 2. Todos los ensayos fueron realizados en el laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.

Tabla 2. Ensayos aplicados en la investigación y normas que se siguieron.

Prueba	Norma
Límites de Consistencia y Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	ASTM D2487-17 ASTM D4318-17
Granulometría	ASTM C136/C136M-19
Hidrometría	ASTM D7928-17
Triaxial no consolidada no drenada (UU)	ASTM D2850-15 UNE-EN ISO 17892-8:2019
Proctor Estándar variante A	ASTM D698-12
Granulometría < malla n° 200	ASTM D421-85(2007) W2016
Granulometría > malla n° 200	ASTM D 422-63(2007) W2016

La prueba triaxial no consolidada no drenada se realizó con tres distintos confinamientos (σ), para cada una de las mezclas estudiadas, como puede observarse en la Tabla 3. Una vez fallados los especímenes se dejaron en el horno por 24 horas a aproximadamente 105 +/-5 °C según la normatividad para conocer la humedad.

Tabla 3. Pruebas UU y presiones de confinamiento aplicadas.

Muestra	Confinamiento (kgf/cm ²)
1	$\sigma_3 = 0.3$
2	$\sigma_3 = 0.6$
3	$\sigma_3 = 0.9$

La distribución granulométrica del suelo natural testigo, para partículas retenidas en malla ASTM n° 200, se realizó siguiendo la norma ASTM D421-85 (2007) W2016; mientras que el material que sí pasó la malla ASTM n° 200 fue analizado mediante la prueba de sedimentación del hidrómetro, con una duración aproximada de una semana para tomar lecturas periódicas acorde a la norma ASTM D 422-63 (2007) W2016. Para clasificar las muestras de suelo arcilloso, se empleó el SUCS regido por la norma ASTM D-2487-17, siendo este sistema el de uso más extendido en la práctica geotécnica. La resistencia al corte se obtuvo utilizando el criterio de falla de Mohr-Coulomb, ley constitutiva del año 1773 que permite conocer la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ). Por otro lado, para la obtención de los especímenes reconstituidos de las pruebas triaxiales UU, se adicionaron los estabilizadores, homogeneizándose e igualando la reconstitución con el Peso Volumétrico Seco Máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) y la humedad óptima ($\omega_{\acute{o}pt}$) obtenidos de la prueba Proctor Estándar (variante A). La humedad óptima ($\omega_{\acute{o}pt}$) es el contenido de agua con el que se obtiene el mejor acomodo de partículas y la relación de vacíos mínima ($e_{m\acute{i}n}$) y también de esta manera el mayor peso volumétrico del material seco, para una determinada energía de compactación, y al peso volumétrico correspondiente se le designa como peso volumétrico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$). El índice de actividad de la arcilla (A) se obtuvo del análisis del hidrómetro, (ASTM D 422-63, 2016) usando la expresión (1). La figura 4 presenta la variación de A para diferentes minerales arcillosos.

$$A = \frac{IP}{\% \text{ de arcilla en peso menos a } 2\mu m} \quad (1)$$

En donde:

A= actividad de la arcilla

IP = índice plástico

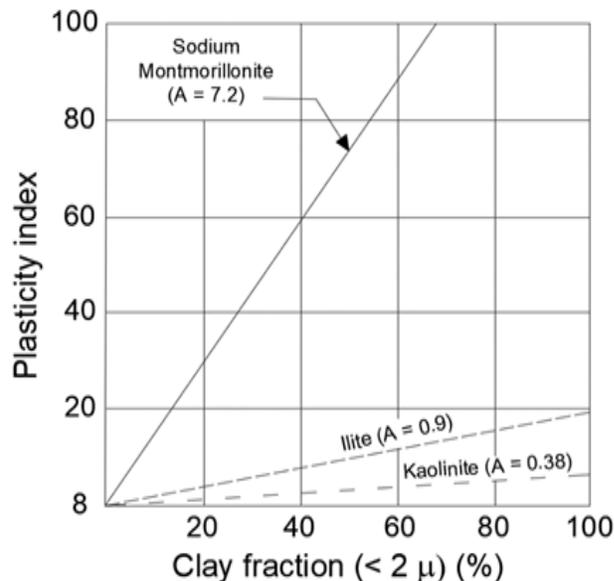


Figura 4. Actividad y correlación entre IP y el porcentaje de fracción de la arcilla < 2 μm (%). (Skempton, 1953).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este estudio, se investigó la modificación de la envolvente de falla en suelos arcillosos con diferentes estabilizadores volumétricos. Por lo tanto, en el transcurso del siguiente apartado se analizarán y discutirán los resultados obtenidos, primeramente, analizando los resultados de las pruebas realizadas al suelo natural remoldeado que actuó como testigo (MT) y posteriormente correlacionando los resultados de las mezclas de suelo también remoldeados, estabilizadas con las siete distintas adiciones.

3.1 Análisis de las muestras de suelos testigo

Los resultados de las pruebas índice se presentan en la Tabla 4, incluyendo la humedad (ω), LL, LP, IP, C_{Lin} y C_{Vol} respectivamente.

Tabla 4. Propiedades índice del suelo de Santiago Undameo, México.

Material	ω (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	C_{Lin} (%)	C_{Vol} (%)
MT	51.15	52.20	19.51	32.69	12.93	42.27

En la Figura 5 se presentan los resultados obtenidos de la granulometría gruesa del suelo arcilloso, realizada tamizando el material con mallas ASTM; y la granulometría fina, que se obtuvo a partir de la prueba de sedimentación con el hidrómetro, en escala semilogarítmica. A partir de este último ensayo se obtuvo la A de la arcilla.

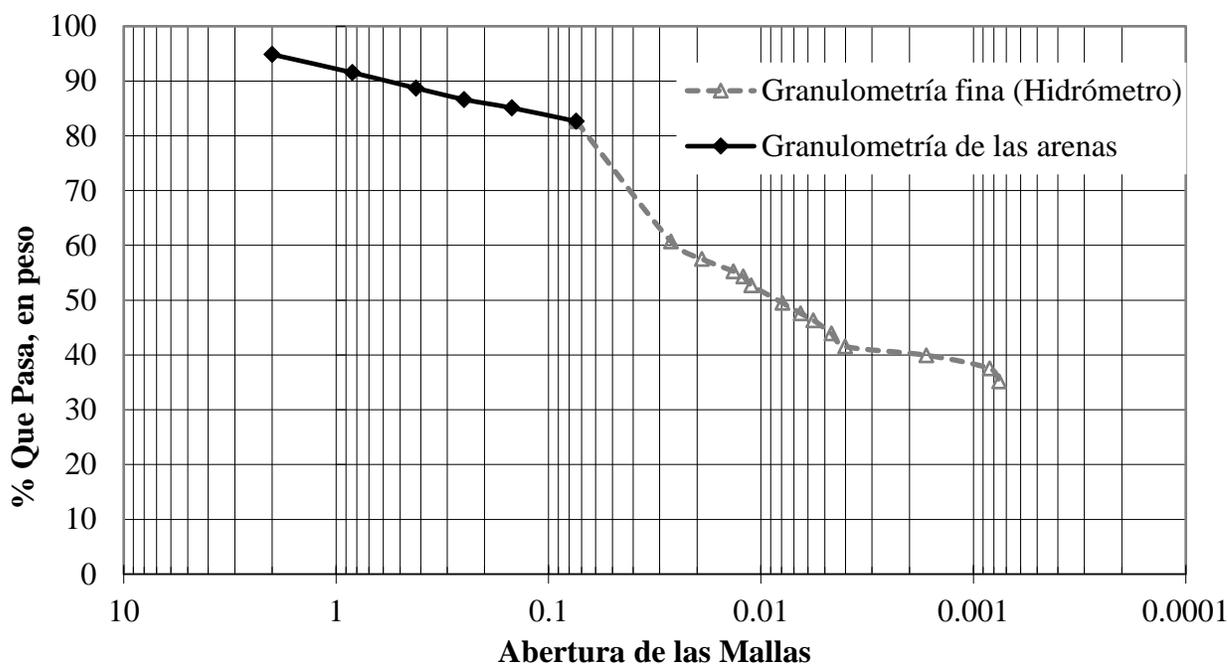


Figura 5. Análisis granulométrico combinado de suelo grueso y suelo fino de la muestra testigo.

Del análisis granulométrico resultó que el 82% del material pasó la malla ASTM n° 200, clasificándose como un suelo fino. Además, los valores del LL e IP, ubicaron al material dentro de la zona CH, según la clasificación SUCS (ver Figura 6). Se llevó a cabo el análisis hidrométrico para obtener la granulometría fina y determinar A de las arcillas. En la Figura 4 se observa que el porcentaje del material que pasa el filtro, menor a $2\mu\text{m}$, es de 40% lo que nos indica una cantidad considerable de partículas tamaño micrométrico, dentro de la muestra de suelo natural de Santiago Undameo.

A partir del IP obtenido, con un valor del 32.7%, se obtuvo una A de 0.81 (Expresión 1). De acuerdo a Skempton el mineral corresponde a una illita (ver Figura 4), que presenta una A mucho menor que por ejemplo el caso de una montmorillonita. Las illitas presentan inconvenientes para la edificación debido a su tendencia a colapsar y a los cambios volumétricos que presentan al entrar en contacto con el agua, siendo problemáticas para las obras civiles (Mirjalili et al., 2020).

3.2 Análisis del suelo arcilloso la arcilla adicionando los diferentes estabilizadores

Para clasificar el suelo arcilloso (% que pasa la malla ASTM n° 200) con los diferentes estabilizadores, se realizó la prueba de los límites de Atterberg. Los resultados obtenidos se presentan en la carta de plasticidad de la Figura 6, donde la posición del suelo inalterado y de las mezclas estabilizadas reflejan su clasificación según el sistema SUCS. El suelo natural de Santiago Undameo se clasifica como una CH, coincidiendo con los resultados de la A presentada por el material. Todas las muestras de suelos adicionados quedaron localizadas en la zona CL, mostrando la evidencia del cambio de propiedades que aportan los estabilizantes; sin embargo, la mezcla que contenía FN se encontró muy cerca del límite entre las arcillas de alta y baja plasticidad. Por otro lado, la combinación que corresponde al suelo natural con un 0.5% de SS adicionado, se clasificó como una CL (ver Figura 6), presentando la mayor disminución del LL de 52.2% de la muestra testigo a 40.2% (ver Tabla 5).

En los casos de arcillas estabilizadas no patrimoniales (ya que por su disponibilidad permiten obtener más cuantificaciones que las muestras patrimoniales) pueden buscarse ecuaciones de correlación (Parisi et al., 2020; Vasic et al., 2020) entre los resultados de las distintas pruebas físico-

mecánicas (Olacia et al., 2020; Rodríguez et al., 2018; Lan et al., 2020). Las ecuaciones de correlación permiten estimar parámetros, ya sea para validar modelos matemáticos o para encontrar relaciones entre las variables con coeficientes de correlación estadísticamente aceptables, estas correlaciones resultan útiles para estimar los parámetros en proyectos de ingeniería donde se utilicen los suelos arcillosos. Existen varios investigadores que han encontrado ecuaciones de correlación entre las variables del suelo y que les han permitido proponer ecuaciones de correlación con fines prácticos (Akkaya, Özvan, y Özvan, 2019; Chompoorat et al., 2022; Wang et al., 2021; Wu et. al., 2022).

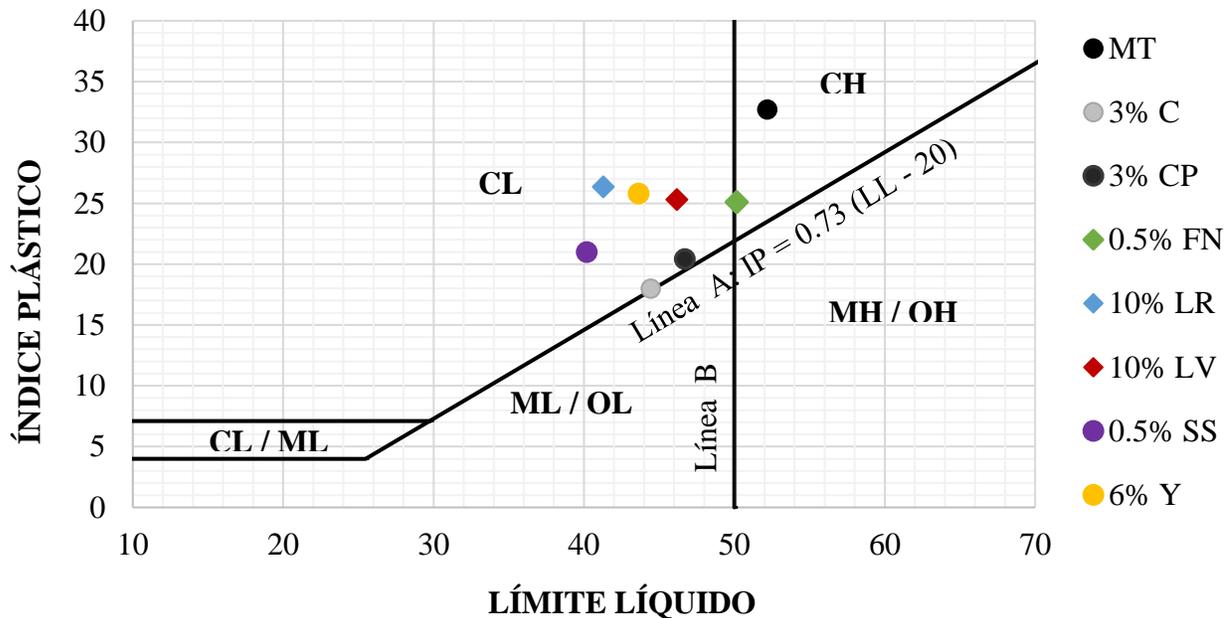


Figura 6. Carta de plasticidad y localización de las muestras originales y estabilizadas.

Tabla 5. Propiedades índices del suelo y las mezclas con los diferentes estabilizadores adicionados.

Material	ω (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	C_{Lin} (%)	C_{Vol} (%)
MT	51.15	52.20	19.51	32.69	12.93	42.27
3 % C	44.28	44.44	26.47	17.97	12.05	43.52
3% CP	46.67	46.71	26.29	20.42	12.33	45.46
0.5% FN	49.38	50.17	25.08	25.09	14.86	54.90
10 % LR	41.10	41.30	14.96	26.34	12.31	41.71
10% LV	46.06	46.19	20.89	25.34	10.04	42.98
0.5% SS	40.71	40.20	19.20	20.99	11.02	40.27
6% Y	44.44	43.64	17.84	25.80	12.26	44.72

La Figura 7 muestra el conjunto de las propiedades índice de cada una de las mezclas estabilizadas y el suelo testigo de Santiago Undameo. En dicha figura se puede observar que los estabilizantes reducen el contenido óptimo de agua (ω), el LL y el IP; por otro lado, también provocan un comportamiento irregular del LP y las C_{Lin} y C_{Vol} , lo que podría corresponder a las características particulares de cada adición. Para estas tres propiedades índice (LP, CL, e IP), los valores obtenidos fueron tanto superiores como inferiores al suelo testigo.

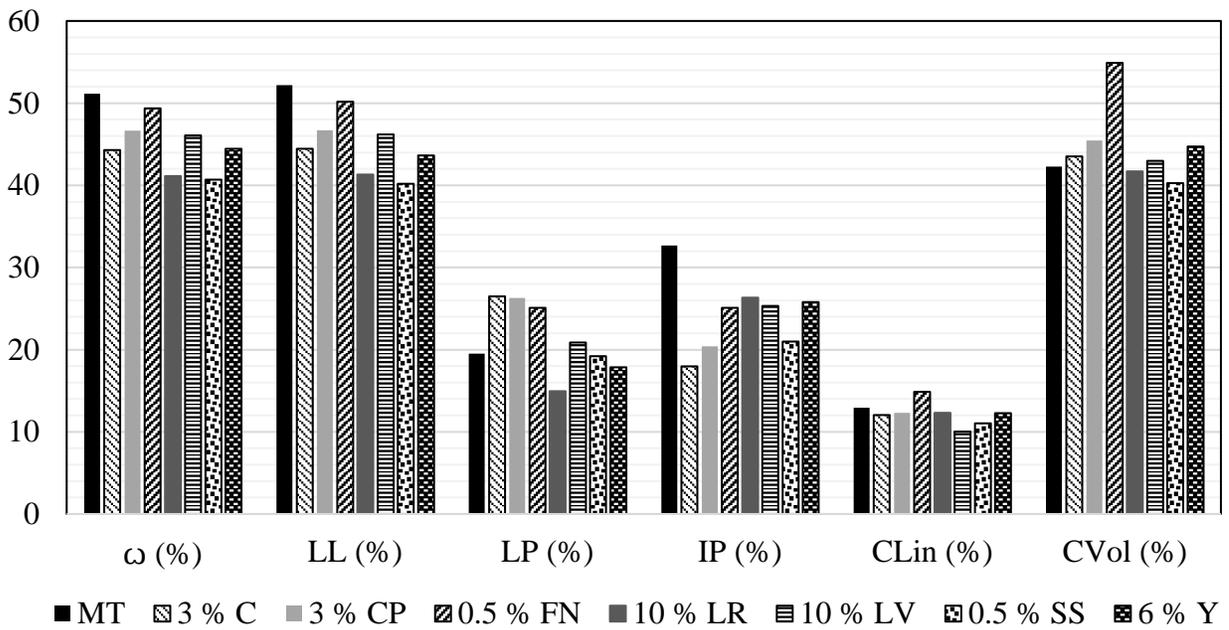


Figura 7. Propiedades índice del suelo testigo y las mezclas con los diferentes estabilizadores adicionados.

La prueba Proctor Estándar determina el contenido de agua necesario para alcanzar el máximo peso específico mediante compactación mecánica (ver Figura 8). En este caso se puede apreciar el efecto de los estabilizadores en la cantidad de agua necesaria y en el incremento o decremento del peso específico máximo posible. Para esta prueba la Figura 8 muestra los comportamientos de la muestra testigo y las mezclas estabilizadas en distintos colores, observando los mayores resultados para LR y los menores para C. Los contenidos óptimos de agua para lograr el máximo peso específico de cada estabilizador se muestran en la Figura 9.

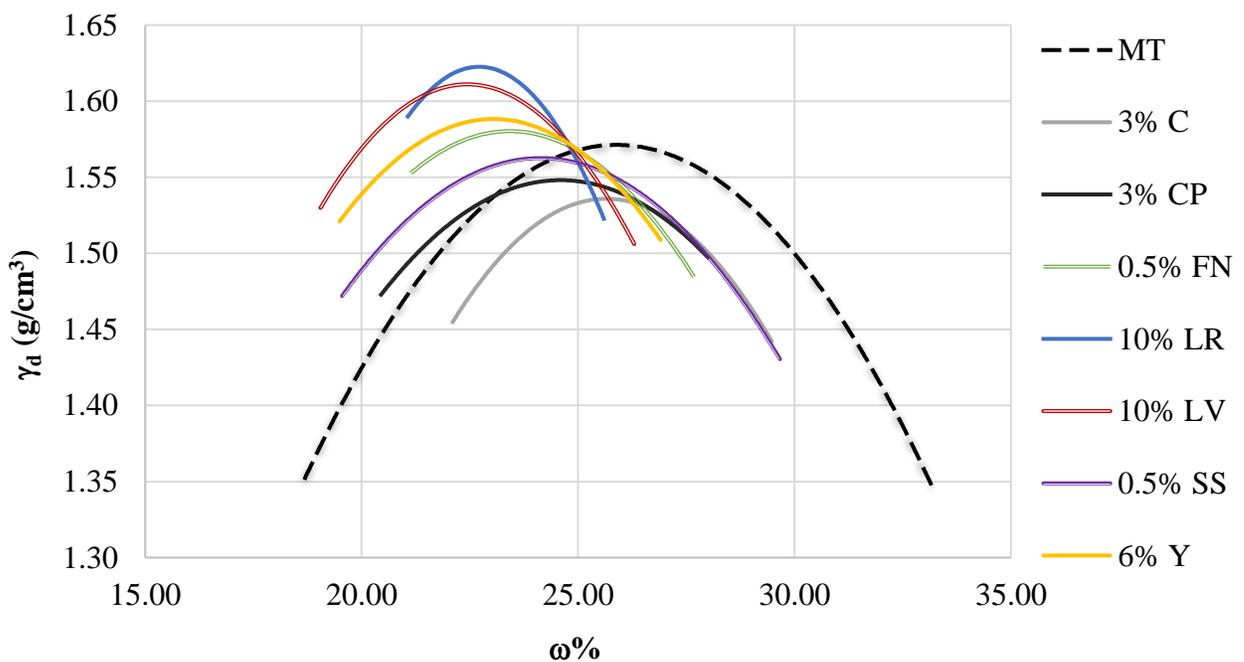


Figura 8. Resultados de la prueba Proctor Estándar (variante A).

La Figura 9 muestra los resultados de la Prueba Proctor Estándar (variante A), permitiendo percibir el efecto que tienen los estabilizadores en cuanto al peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) y al contenido óptimo de agua ($\omega_{\acute{o}pt}$) para llevar a cabo su compactación en el laboratorio. Observando el gráfico, podemos discernir una clara disminución del contenido óptimo de agua con la adición de C, CP y FN; dicha disminución de la $\omega_{\acute{o}pt}$ impacta también en un menor $\gamma_{dm\acute{a}x}$, lo que puede ser atribuido a las propiedades de trabajabilidad y plasticidad que caracterizan a estos materiales, sin perder de vista que el agua es un lubricante para el acomodo de las partículas, el óptimo corresponderá al valor mayor de $\gamma_{dm\acute{a}x}$. Tanto el CP como C destacan por mantener cierto grado de fluidez durante determinado tiempo para facilitar su uso durante los trabajos de construcción; además, este mismo comportamiento se ha observado en mezclas de morteros base cal y cemento portland que incorporan FN (Díaz-Blanco, et al., 2019; Knapen y Van Gemert, 2009; Ramírez-Arellanes et al., 2012).

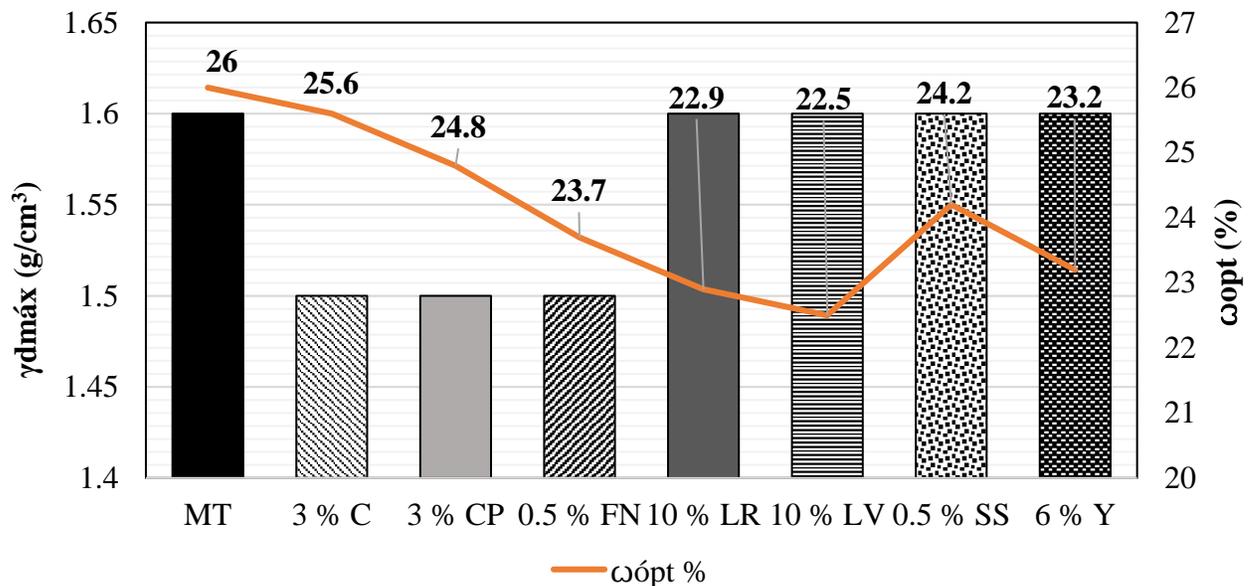


Figura 9. Resultados de la prueba Proctor Estándar (Variante A) en función del contenido óptimo de agua.

Respecto a los líticos utilizados, es evidente que estos no cambian sus propiedades físicas en presencia de agua, por tanto, no interfieren en la $\omega_{\acute{o}pt}$; sin embargo, sí disminuyen el $\gamma_{dm\acute{a}x}$ de la muestra sin adición, lo cual se puede atribuir al tamaño de partícula, porosidad y densidad de la misma, puesto que ocupan mayor volumen que el suelo testigo. El SS se puede comportar en cierta medida como un lítico si el agua se agrega a temperatura ambiente, y además su disolución en la muestra puede ser más lenta que el tiempo necesario para la ejecución de la prueba.

La Figura 9 revela pequeñas variaciones del parámetro $\gamma_{dm\acute{a}x}$ (Miranda, 2017), mientras que los cambios más significativos son los que ocurren con el contenido óptimo de agua $\omega_{\acute{o}pt}$, con variaciones mucho más notables. Este contenido de agua también es necesario para posteriormente obtener el parámetro $e_{mín}$.

3.3 Pruebas triaxiales no consolidadas no drenadas (UU)

Para realizar las pruebas triaxiales UU se utilizaron especímenes reconstituidos, para los ocho casos que consideran al suelo natural más las siete mezclas adicionales. Se probaron un total de 144 especímenes (ver Figura 10).

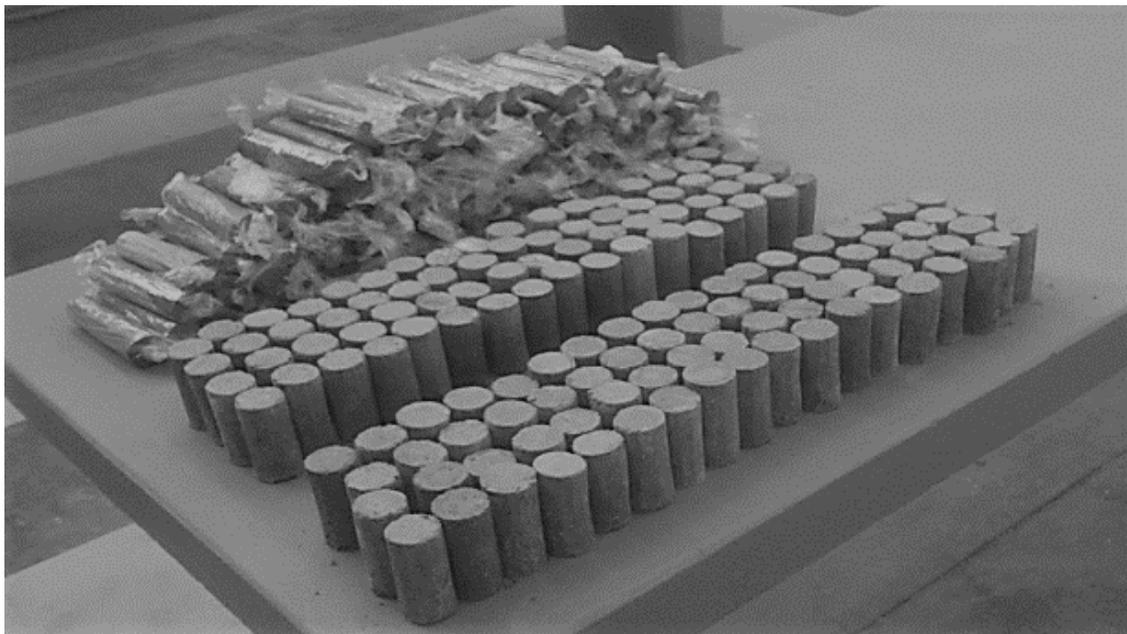


Figura 10. 144 especímenes de suelos arcillosos con distintos estabilizantes para la prueba triaxial UU (Miranda, 2017).

En la Figura 11 podemos observar la correlación entre Esfuerzo desviador (σ) y la Deformación unitaria (ε), datos que nos indican el tipo de falla obtenido para cada una de las combinaciones entre el suelo arcilloso testigo y con sus estabilizantes. Las muestras que presentaron una mejora en su plasticidad (CL) presentaron cambios en su comportamiento expansivo. Este comportamiento de las mezclas es muy significativo, ya que puede mejorar a estos materiales e impactar muy positivamente en su uso para aplicaciones de construcción, los estabilizadores pueden ser usados en campo entre muchos otros usos.

Prácticamente todas las mezclas mejoraron su comportamiento en cuanto a esfuerzo a compresión y deformaciones. Es evidente que la mezcla con 6% Y como estabilizante mejora al material rigidizándolo y aumentando su esfuerzo a compresión, esto se observa al presentar una mayor pendiente en la curva descrita por este material.

La estabilización de suelos con yeso no es muy común en la práctica y la información sobre su comportamiento es muy limitada, sin embargo, con los resultados mostrados se ofrece una certeza en su uso, pero es sabido que el yeso es soluble en agua, por lo cual requiere de cuidadosas medidas de protección. Por debajo de las mezclas con Y se encuentran con un comportamiento muy similar las mezclas con C, LR y CP, que son materiales ampliamente utilizados en la estabilización de suelos y se esperaba una mejora en el material, ya que por ejemplo en el caso de mezclas con C, al producirse la reacción de cal y agua el suelo disminuye su permeabilidad y aumenta la capacidad de carga en pocas horas formando finalmente una capa estructural fuerte y flexible (Reginaldo et al., 2018).

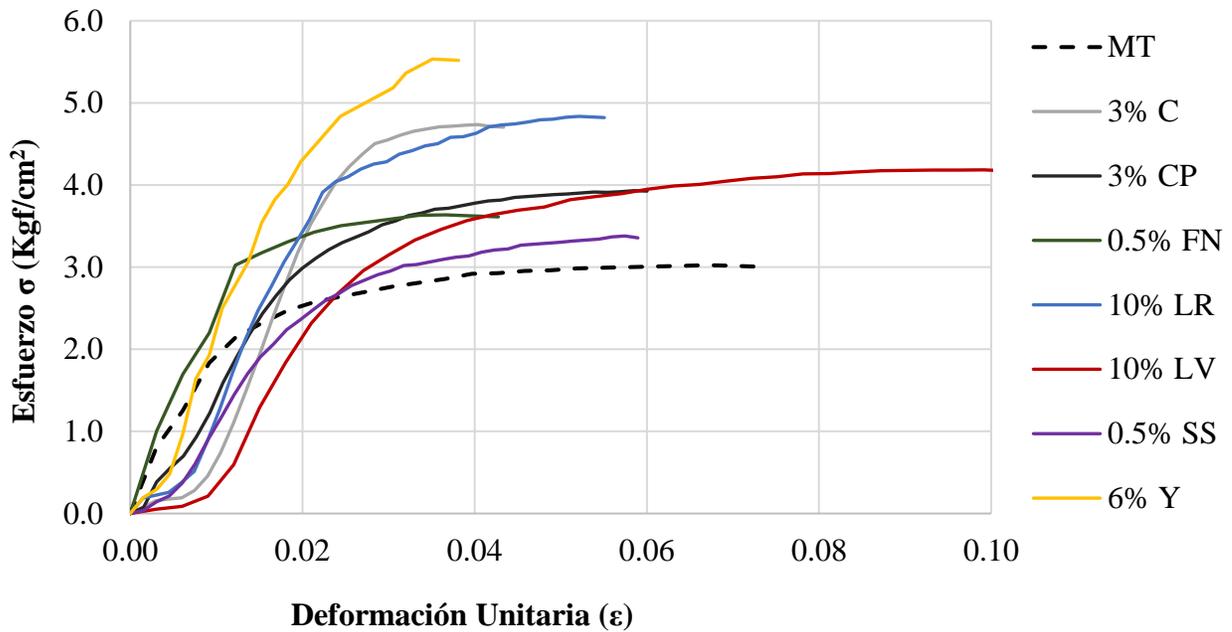


Figura 11. Curvas Esfuerzo desviador σ - Deformación unitaria ϵ .

En la Figura 12 se muestra un ejemplo de envolvente de falla, utilizando al menos 3 círculos de Mohr para conocer la tendencia de la línea envolvente, y con ella, calcular la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (φ).

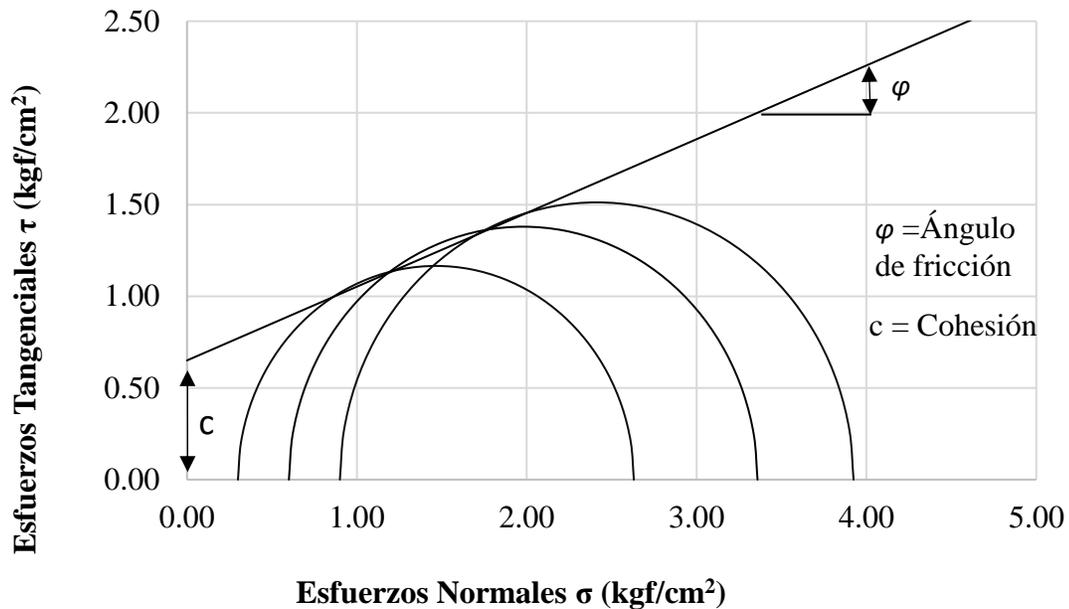


Figura 12. Envolvente de falla obtenida para el suelo natural, obteniéndose $c = 0.65 \text{ kgf/cm}^2$ y $\varphi = 22^\circ$.

A fin de simplificar la observación de las envolventes de falla y su representación gráfica, se presenta la figura 13 con el resumen de resultados de los suelos arcillosos adicionados con los distintos estabilizadores, sin colocar los respectivos 3 círculos de Mohr que dieron origen a la envolvente.

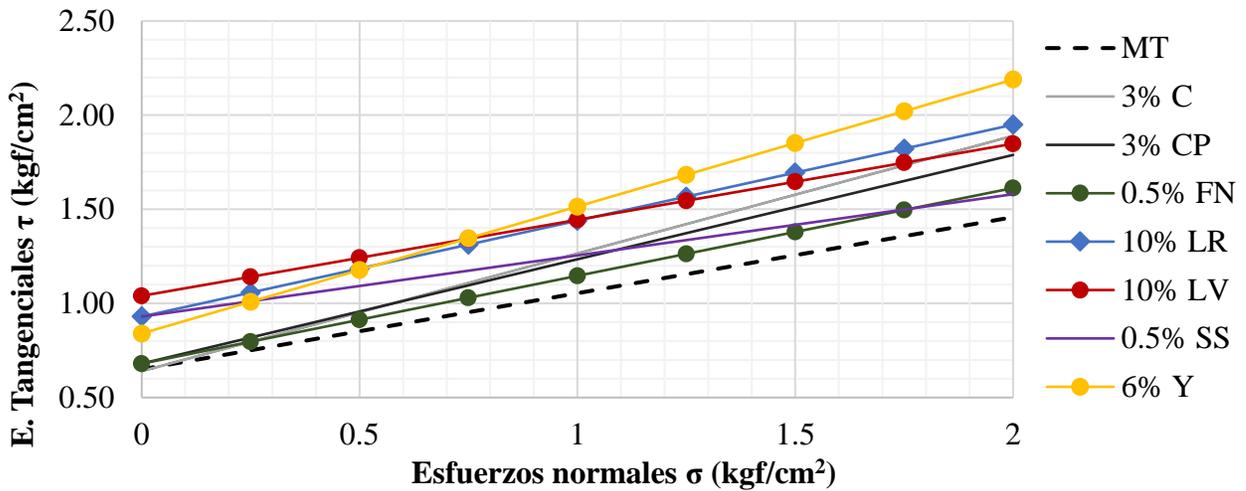


Figura 13. Comparativa de envolventes de falla del suelo arcilloso de Santiago Undameo, natural (Testigo) y con estabilizadores.

En la Figura 14 se puede comprobar como todos los estabilizadores utilizados mejoran en mayor o menor medida la cohesión. La variación en el nivel de mejora de la cohesión (c) depende de las características particulares de cada estabilizador con respecto a esta materia prima o suelo arcilloso natural. En esta prueba destacaron particularmente los LR, LV, SS y Y. Respecto al ángulo de fricción interna (ϕ), se observa un comportamiento inversamente proporcional al presentado por la cohesión, dado que los mejores resultados corresponden a la C, CP y Y; estos tres estabilizadores son materiales que reaccionan químicamente con el agua y forman nuevas fases mineralógicas más resistentes mecánicamente, lo cual impacta positivamente en el valor de ϕ . Resulta muy interesante el hecho de que, Y impacte positivamente en ambas variables, siendo el único estabilizador con este comportamiento.

Cabe mencionar que el incremento del ángulo de fricción interna es más significativo que el incremento de la cohesión, siendo especialmente apreciado y favorable para los usos de los suelos utilizados en la construcción. Esto es debido a que la resistencia mecánica puede variar fácilmente al adicionarse agua a las partículas del suelo, por lo que la capacidad de resistir cobra una mayor importancia debido a la unión entre las partículas del suelo arcilloso.

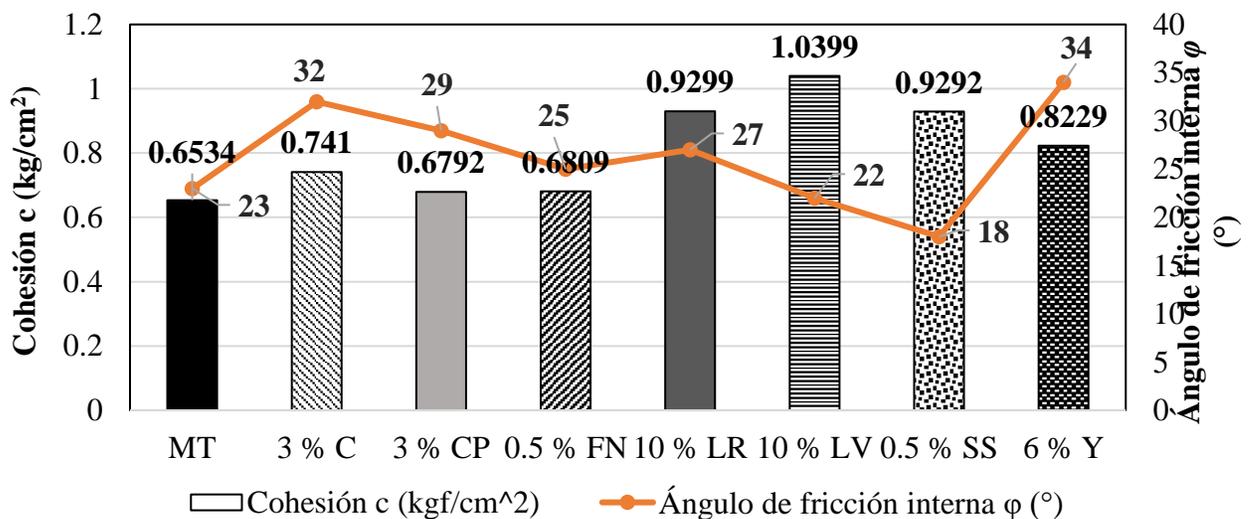


Figura 14. Valores de cohesión (c) y ángulo de fricción interna (ϕ) de la muestra testigo y las mezclas con distintos estabilizadores.

4. CONCLUSIONES

Los resultados presentados corresponden y se limitan al estudio de los suelos arcillosos de Santiago Undameo, en Michoacán, México. Es importante remarcar que cualquier extrapolación a un material de estudio similar debe ser cuidadosa y basarse en la experimentación directa del mismo. La metodología desarrollada en este trabajo y el grado de innovación de los ensayos respecto al conocimiento de estos materiales pueden ser de gran utilidad en aplicaciones relacionadas con la construcción y la restauración de bienes inmuebles.

Al mejorar un suelo estamos impactando positivamente en nuestro medio ambiente, ya que se logra obtener beneficios ambientales y económicos. por ejemplo, los costos por transporte de los materiales se incrementan sustancialmente con la distancia a la cual se encuentra el sitio de su explotación; se permite, con la estabilización, que aquellos materiales que no cumplen con los requerimientos de normas, como es el caso más frecuente con los materiales que se encuentran in situ, alcancen la resistencia necesaria para que su desempeño, dentro de la estructura del pavimento, sea satisfactoria; o que se logre un mejor comportamiento de estos materiales, disminuyendo espesores de las estructuras de pavimento a construir, lo cual implica que los presupuestos para obras de pavimentación vial se reduzcan de forma significativa y se explote en menor medida las canteras o bancos de material.

Las envolventes de falla a partir de la muestra original (suelo natural remodelado sin estabilizar) permitieron determinar el cambio en el esfuerzo máximo soportado, por medio de la obtención de la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna para cada caso (ϕ), siendo este el principal aporte de la investigación.

Los resultados obtenidos demostraron que seis de los estabilizantes adicionados al suelo arcilloso testigo modifican su clasificación SUCS, transitando de CH a CL. La muestra adicionada con 3% C (hidróxido de calcio) mostró mejores resultados comparado con las otras muestras adicionadas, esto debido a que la mezcla se ubicó cerca de la línea límite entre los limos y las arcillas de baja plasticidad. Por otra parte, FN no presentó grandes modificaciones en las propiedades del material, posicionándolo en el umbral entre la alta plasticidad y baja plasticidad. Los estabilizadores aportan muchos otros cambios en las propiedades de los suelos, sin embargo, la plasticidad es uno de los más importantes, debido a los problemas explicados anteriormente que presentan las construcciones de tierra, la infraestructura, y los inmuebles patrimoniales.

Con las envolventes de falla, se observó un cambio en la cohesión c y en el ángulo de fricción ϕ , dando como resultado un incremento en la resistencia mecánica de algunas mezclas. Los estabilizadores que propiciaron mayor fricción entre las partículas del suelo (mayor ϕ) corresponden al Y, C, CP, LR y FN. Por el contrario, LV no aporta incremento de las propiedades mecánicas, resultando en un ángulo de fricción (ϕ) muy similar al del suelo natural; adicionalmente, SS tampoco tuvo mucho éxito en este cometido.

La adición de algunos estabilizadores garantiza un incremento significativo de las propiedades mecánicas de los suelos expansivos. Para el caso particular de la arcilla en Santiago Undameo, el adicionar C y Y como estabilizantes mostraron mejoras en las propiedades físicas y mecánicas. Estos estabilizadores disminuyen la plasticidad y mejoran la trabajabilidad del material siendo una propiedad muy atractiva para usos de construcción y restauración con cambios estéticos y colorimétricos mínimos. Los dos materiales (C y Y) requieren menor cantidad de energía que otros estabilizantes industriales para su producción, por lo que suponen un menor impacto ambiental siendo más sustentables.

En el caso de adobes para conservación del patrimonio vernáculo mexicano, con problemas de supervivencia y dificultades para estabilización con los materiales históricos tradicionales, se demuestra que la cal sigue siendo la mejor opción para estabilización de arcillas, contrastada contra el CP. Sin embargo, este último ha demostrado su utilidad para otros propósitos, como por ejemplo

la elaboración de BTC, una tecnología constructiva de bajo impacto que puede alcanzar resistencias mecánicas considerables y que presenta un mejor comportamiento ante la presencia de agua debido a su proceso de compactación.

Finalmente se puede concluir que las siete adiciones propuestas, al analizarse en el laboratorio bajo normativa internacional ASTM, mejoraron el comportamiento del suelo altamente plástico, al disminuirse las deformaciones lineales y volumétricas y al incrementarse la resistencia mecánica y el ángulo de fricción interna de los suelos arcillosos adicionados. La investigación contribuye favorablemente en el mejoramiento de los suelos arcillosos empleados en la restauración de construcciones de tierra histórico-patrimoniales, obra civil, patologías en edificaciones y tecnologías constructivas.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero de la Coordinación de la Investigación Científica y del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de Facultad de Ingeniería Civil, de la UMSNH; del CONACYT con Proyecto Pronaces 321260 y el Programa de Becas Nacionales; de la SEP, Secretaría de Educación Pública en sus programas Prodep/Promep; así como el invaluable soporte técnico de los Ingenieros O. S. Miranda Leal, F. J. Jerónimo Rodríguez, J. I. Bocanegra Torres y P. García Díaz en las cuantificaciones mecánicas, y del LANCIC-UNAM para la micro caracterización del material.

6. REFERENCIAS

- Abhilash, H. N., Hamard, E., Beckett, C. T., Morel, J.-C., Varum, H., Silveira, D., Ilampas, R. (2022), Chapter 4. Mechanical Behaviour of Earth Building Materials. En A. Fabbri, J.-C. Morel, J.-E. Aubert, Q.-B. Bui, D. Gallipoli, B. V. Venkatarama Reddy (Eds.), “*Testing and Characterisation of Earth-based Building Materials*”, Springer, cap. 4, pp. 127-180. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-83297-1_4
- Akkaya, İ., Özvan, A., Özvan, E. E. (2019), *A new empirical correlation between pressuremeter modules (EM) and shear wave velocity (Vs) for clay soils*. Journal of Applied Geophysics. 171(103865). <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103865>
- Alonso, E., Martínez-Gomez, L., Martínez, W., & Castano, V. M. (2002), *Preparation and Characterisation of Ancient-Like Masonry Mortars*. Advanced Composite Letters. 11(1). doi: <https://doi.org/10.1177/096369350201100105>
- Araya-Letelier, G., Antico, F. C., Burbano-García, C., Concha-Riedel, J., Norambuena-Contreras, J., Concha, J., & Saavedra Flores, E. I. (2021), *Experimental evaluation of adobe mixtures reinforced with jute fibers*. Construction and Building Materials. 276(122127). doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122127>
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). (1998). *UNE 103402: Determinación de los Parámetros Resistencia de Una Muestra de Suelo en el Equipo Triaxial*.
- Asociación Española de Normalización (AENOR) (2019), *UNE-EN ISO 17892-8:2019 Investigación y ensayos geotécnicos; Ensayos de laboratorio de suelos, Parte 8: ISO 17892-8:2018 Ensayo triaxial sin consolidación y sin drenaje*.
- ASTM International (2019), *ASTM C136/C136M-19 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. doi: https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19
- ASTM International (2017), *ASTM D7928-17 Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis*. doi: <https://doi.org/10.1520/D7928-17>

- ASTM International (2017). *ASTM D2487-17 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. doi: <https://doi.org/10.1520/D2487-17>
- ASTM International (2017). *ASTM D4318-17e1 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. doi: <https://doi.org/10.1520/D4318-17>
- ASTM International (2021). *ASTM D698-12e2 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³(600 kN-m/m³))*. doi: <https://doi.org/10.1520/D0698-12R21>
- ASTM International (2015). *ASTM D2850-15 Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils*. doi: <https://doi.org/10.1520/D2850-15>
- ASTM International. (2007) *ASTM D421-85 Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants (Withdrawn 2016)*.
- ASTM International (1998). *ASTM D 422-63 (Reapproved 1998) Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*.
- Chompoorat, T., Thepamong, T., Khamplod, A., Likitlersuang, S. (2022), *Improving mechanical properties and shrinkage cracking characteristics of soft clay in deep soil mixing*. Construction and Building Materials. 316(125858). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125858>
- Costa, C., Cerqueira, Â., Rocha, F., & Velosa, A. (2019), *The sustainability of adobe construction: past to future*. International Journal of Architectural Heritage. 13: 639-647. doi: <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1459954>
- Daneels, A., Romo de Vivar, A., Chávez, L., Reyes, M., Tapia, E., León, M., . . . Otero, F. J. (2020), *Bitumen-stabilized earthen architecture: The case of the archaeological site of La Joya, on the Mexican Gulf Coast*. Journal of Archaeological Science: Reports, 34(A). doi: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102619>
- Díaz-Blanco, Y., Menchaca-Campos, C., Rocabruno-Valdés, C. I., Uruchurtu-Chavarín J. (2019), *Influencia de un aditivo natural (mucílago de nopal) en las propiedades electroquímicas del acero de refuerzo del concreto*. Revista ALCONPAT. 9 (3): 260- 276. doi: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i3.429>
- Flores Rentería, A. (2010), “*La norma ASTM D6276 como instrumento de estabilización de suelos para fines patrimoniales*”. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo.
- Kalifala, D., Ouedraogo, M., Millogo, Y., Aubert, J. E., Gomina, M. (2018), *Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement*, Construction and Building Materials. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.001>
- Knapen, E., Van Gemert, D. (2009), *Cement hydration and microstructure formation in the presence of water-soluble polymers*. Cement and Concrete Research. 39(1): 6-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.10.003>
- Ige, O. and Danso, H. (2021), *Physico-mechanical and thermal gravimetric analysis of adobe masonry units reinforced with plantain pseudo-stem fibres for sustainable construction*. Construction and Building Materials. 273(121686). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121686>
- Jitha P. T., Sunil Kumar B., Raghunath, S. (2020), *Strength development and masonry properties of geopolymer stabilised soil-LPC (lime-pozzolana cement) mixes*. Construction and Building Materials. 250(118877). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118877>
- Laborel-Préneron, A., Faria, P., Aubert, J.-E., Magniont, C. (2021), *Assessment of Durability of Bio-based Earth Composites*. Recent Progress in Materials. 3(2). doi:10.21926/rpm.2102016
- Lan Guanqi, L., Yihong Wan, Y., Xin, L., Liu, Y. (2020), *Shear test method analysis of earth block masonry mortar joints*. Construction and Building Materials. 264 (119997). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119997>

- Li Piani, T., Weerheijm, j., Peroni, M., Koene, L., Krabbenborg D., Solomos, G., Sluys, L. J. (2020), *Dynamic behaviour of adobe bricks in compression: The role of fibres and water content at various loading rates*, Construction and Building Materials. 230(117038). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117038>
- Martínez, W., Alonso, E. M., Rubio, J. C., Bedolla, J. A., Velasco, F. A., Torres, A. A. (2008), *Comportamiento Mecánico de Morteros de Cal Apagada Artesanalmente, Adicionados con Mucílago de Cactácea y Ceniza Volcánica, para su uso en Restauración y Conservación de Monumentos Coloniales*. Revista de la Construcción. 7(2): 93-101.
- Martínez, W., Torres-Acosta, A. A., Alonso-Guzmán, E. M., Chávez, H. L., Lara, C., Bedolla, A., Ruvalcaba, J. L. (2018), *Colorimetry of clays modified with mineral and organic additives*. Revista ALCONPAT. 8(2):163-177. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i2.277>
- Mauricio, A. C., Grieseler, R., Heller, A. R., Kelley, A. R., Rumiche, F., Sandweiss, D. H., Viveen, W. (2021), *The earliest adobe monumental architecture in the Americas*. PNAS, 118(48). doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.2102941118>
- Miranda Leal O. S. (2017), “*Envolvente de falla en arcilla de Santiago Undameo, con diferentes estabilizadores; realizados en la máquina triaxial Soiltest t-500*”. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo.
- Mirjalili, A., Eslami, A., Morshed, R. (2020), *Experimental investigation into the effect of vertical loading on in-plane cyclic behavior of adobe walls*. Construction and Building Materials. 264(120706). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120706>
- Moraes, J. C., Akasaki, J. L., Melges, J. L., Monzó, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., . . . Tashima, M. M. (2015), *Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolanic material in blended Portland cement: Microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars*. Construction and Building Materials. 94: 670-677. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.108>
- Nagaraj, H. B., Sravan, M. V., Arun, T. G., & Jagadish, K. S. (2014), *Role of lime with cement in long-term strength of Compressed Stabilized Earth Blocks*. International Journal of Sustainable Built Environment. 3(1): 54-61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijse.2014.03.001>
- Navarro Mendoza, E. G., Sánchez Calvillo, A., Alonso Guzmán, E. M. (2019), “*Estabilización de suelos arcillosos con cal para firmes y blocks*”. En C. Neves, Z. Salcedo Gutiérrez, O. Borges Faria (Eds.), 19° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, FUNDASAL / PROTERRA). San Salvador: El Salvador, pp. 284-291.
- Ojeda Farías, O. F., Baltazar Zamora, M. Á., Mendoza Rangel, J. M. (2018), *Influence of sugar cane bagasse ash inclusion on compacting, CBR and unconfined compressive strength of a subgrade granular material*. Revista ALCONPAT. 8(2): 194-208. doi: <https://doi.org/10.21041/ra.v8i2.282>
- Olacia, E., Pisello, A. L., Chiodo, V., Maisano, S., Frazzica, A., Cabeza, L. F. (2020), *Sustainable adobe bricks with seagrass fibres. Mechanical and thermal properties characterization*. Construction and Building Materials. 239(117669). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117669>
- Parisi, F., Balestrieri, C., Varum, H. (2019), *Nonlinear finite element model for traditional adobe masonry*. Construction and Building Materials. 223: 450-462. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.001>
- Pérez Nora, A., Bucio, L., Lima, E., Soto, E., Cedillo, C. (2016), *Identification of allophane and other semi-crystalline and amorphous phases on pre-Hispanic Mexican adobe earth bricks from Cholula, Mexico*. Microchemical Journal. 126(349-358). <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.12.033>

- Rodríguez-Mariscal, J. D., Solís, M., Cifuentes, H. (2018), *Methodological issues for the mechanical characterization of unfired earth bricks*. Construction and Building Materials. 175: 804-814. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.118>
- Ramírez-Arellanes, S., Cano-Barrita, P. F. de J., Julián-Caballero, F., Gómez-Yañez, C. (2012), *Propiedades de durabilidad en concreto y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucílago de nopal como aditivo natural*. Materiales de Construcción. 62(307): 327–341. doi: <https://doi.org/10.3989/mc.2012.00211>
- Reginaldo-Sérgio, P., Fabiano-Emmert, E., Pereira-Miguel A. G. (2018), *Soil Stabilization with Lime for the Construction of Forest Roads*. Floresta e Ambiente. 25(2). <https://doi.org/10.1590/2179-8087.007715>
- Sanchez-Calvillo, A., Alonso-Guzman, E. M., Martinez-Molina, W., Navarrete-Seras, M. A., Ruvalcaba-Sil, J. L., Navarro-Ezquerria, A., Mitrani, A. (2021), *Characterization of adobe blocks: Point-load assessment as a complementary study of damaged buildings and samples*. Heritage. 4(2): 864-888. doi: <https://doi.org/10.3390/heritage4020047>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) (2007), *M-MMP-1-07/07. Límites de Consistencia*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) (2006), *M-MMP-1-09/06. Métodos de muestreo y prueba de materiales. Compactación AASHTO*.
- Sharma, V., Vinayak, H. K., & Marwaha, B. M. (2015), *Enhancing sustainability of rural adobe houses of hills by addition of vernacular fiber reinforcement*. International Journal of Sustainable Built Environment. 4(2): 348-358. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2015.07.002>
- Skempton, A. W. (1953). "The colloidal activity of clays" en: Proceedings of the third international conference on soil mechanics and foundation engineering. ICOSOMEF, Zurich: Switzerland, pp. 57-61.
- Taallah, B., Guettala, A. (2016), *The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers*. Construction and Building Materials. 104(1): 52-62. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.007>
- Vasic M.V., Pezo, L. L., Radojevic, Z. (2020), *Optimization of adobe clay bricks based on the raw material properties (mathematical analysis)*. Construction and Building Materials. 244(118342). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118342>
- Wang, C., Li, S., He, X., Chen, Q., Zhang, H., & Liu, X. (2021), *Improved prediction of water retention characteristic based on soil gradation and clay fraction*. Geoderma. 404(115293). <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115293>
- Wu, B., Li, L., Xu, L., Li, X. (2022), *Modelling sheet erosion on steep slopes of clay loess soil using a rainfall simulator*. Biosystems Engineering. 216:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.017>
- Yetgin, Ş., Çavdar, Ö., Çavdar, A. (2008), *The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes*. Construction and Building Materials. 22(3): 222-227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.022>