

Modificações da envoltória de ruptura em solos argilosos com diferentes 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 Contato: elia.alonso@umich.mx

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

Recepção: 01/03/2022 | Aceitação: 19/04/2022 | Publicação: 01/05/2022

RESUMO

Foram analisadas as modificações apresentadas por diferentes estabilizantes (cal, cimento, fibra de figueira-da-índia (palma), líticos fluviais, líticos vulcânicos, 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.

Citar como: Sánchez, A., Alonso, E., Martínez, W., Chávez, H., Navarrete, M., Arreola, M., Borrego, J., Equihua, L., Núñez, E., Miranda, O. (2022), “Modificações da envoltória de ruptura em solos argilosos com diferentes estabilizadores volumétricos”, Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 227 – 247, DOI: [se asigna al publicar el artículo](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

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, os testes foram realizados por O. Miranda (50%), L. Equihua (25%), E. Nuñez (25%); a atividade de pesquisa bibliográfica O. Miranda (25%), L. Equihua (25%), A. Sanchez (25%) e E. Alonso (25%); a atividade de extração de informação por E. Nuñez (20%), J. Borrego (20%), A. Sanchez (20%), E. Alonso (20%), W. Martinez (20%); análise e discussão dos resultados por M. Navarrete (25%), M. Arreola (25%), J. Borrego (25%), H. Chavez (25%); a redação do documento por A. Sanchez (20%), H. Chavez (20%), W. Martinez (20%), M. Navarrete (20%) e M. Arreola (20%); a revisão do texto por E. Alonso (20%), H. Chavez (20%), M. Arreola (20%), M. Navarrete (20%) e J. Borrego (20%); desenho da figura e adaptação do formato por W. Martinez (25%), L. Equihua (25%), E. Nuñez (25%) e O. Miranda (25%); Tradução inglesa A. Sanchez (100%).

Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 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; cohesion; angle of internal friction; restoration.

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

RESUMEN

Se analizaron modificaciones presentadas por distintos estabilizadores (cal, cemento, fibra de nopal, lútics de río, lútics 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.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da 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. INTRODUÇÃO

Os solos argilosos, também chamados de argilas, são usados para muitas aplicações, inclusive como material de construção, e são elementos essenciais para nossa sociedade desde os primórdios da civilização até os tempos modernos. Diferentes elementos construtivos como o adobe têm sido utilizados em culturas e lugares muito diversos, como é o caso dos continentes europeu e americano, com exemplos de antiguidade excepcional (Mauricio, et al., 2021). Podemos encontrar importantes exemplos da utilização dos solos como elementos impermeáveis nos núcleos de barragens e corpos d'água para agricultura e irrigação, fabricação de cimento Portland, construção de estradas e rodovias, para confecção de peças e componentes cerâmicos, na arquitetura vernacular e de terrenos, como elementos para a restauração de estruturas históricas e edifícios patrimoniais, para zonas úmidas, limpeza e tratamento de água.

Devido à sua fácil acessibilidade e abundância de material em muitas e variadas regiões do planeta, os solos argilosos têm uma excelente valorização devido às suas propriedades sustentáveis e ao baixo impacto energético e ambiental que geram (Costa et al., 2019). As argilas são por definição sedimentos minerais constituídos principalmente por agregados de silicatos de alumínio hidratados e granulometria finamente dividida. Além disso, as argilas têm excelentes propriedades aglutinantes, razão pela qual historicamente têm sido usadas como materiais cimentícios (Sanchez-Calvillo, et al., 2021).

No México, existem diferentes tipos de argilas que foram usadas para construção ao longo do tempo; em particular, no estado de Michoacán, encontramos a presença de argilas em componentes de construção como alvenaria de adobe, tijolos cerâmicos, argamassas de assentamento e terra, entre muitos outros. Santiago Undameo, cidade localizada no nordeste do estado de Michoacán, possui um dos bancos de argila mais importantes da região devido à sua proximidade com a capital do estado, Morelia, (ver Figura 1) cujo centro histórico está inscrito na lista Patrimônio Mundial da UNESCO, e possui mais de 1.000 edifícios com caráter patrimonial, todos eles construídos com técnicas construtivas tradicionais e coloniais, com uso extensivo de solos argilosos e outros materiais locais da região.



Figura 1. (a) Localização do estado de Michoacán no México; (b) Localização do município de Morelia, incluindo Santiago Undameo, no estado de Michoacán.

Os solos desta localidade possuem uma proporção de material argiloso, que devido às suas propriedades de alta plasticidade apresentam instabilidade causando consideráveis alterações volumétricas em contato com a água, o que geralmente causa problemas patológicos em edificações e obras civis. Historicamente, uma grande variedade de materiais têm sido utilizados como estabilizadores de argilas, para reduzir a alta plasticidade higroscópica que apresentam e, conseqüentemente, reduzir a retração e expansão linear e volumétrica em contato com a água

(Daneels et al., 2020). Esta estabilização é essencial para áreas como arquitetura e construção com terra, as bases e sub-bases de pavimentos flexíveis; uma vez que contribui para aumentar a durabilidade destas estruturas à medida que a resistência mecânica aumenta (Laborel-Préneron et al., 2021), sendo todas estas propriedades muito apreciadas no setor da construção.

O interesse da presente investigação reside na complexidade dos solos analisados em Santiago Undameo, uma vez que (historicamente) apresentam uma elevada plasticidade e conseqüentemente consideráveis deformações volumétricas que afetam a estabilidade das construções existentes na região de estudo.

Por outro lado, a arquitetura de terra no estado de Michoacán e em geral no México, apesar de sua riqueza, variedade e importância cultural, foi deslocada e abandonada, por isso é essencial aumentar o trabalho de pesquisa sobre esse recurso sustentável e facilmente acessível às comunidades. Além disso, a compreensão do comportamento desses solos argilosos em combinação com diferentes estabilizantes ajudará a melhorar a intervenção, restauração e compreensão das patologias existentes.

Existem muitos materiais que são usados como estabilizadores de argila para construção, muitos deles com formação em estudos científicos: cal (Taallah e Guettala, 2016; Navarro Mendoza et al., 2019), cimento Portland (Dao et al., 2018; Jitha et al., 2020), fibra desidratada em pó de cacto opuntia ficus indica (Ige y Danso, 2020; Li Piani, 2020), líticos fluviais, líticos vulcânicos, sulfato de sódio e gesso (sulfato de cálcio semi-hidratado) (Martínez, et al., 2018).

Estabilizações com cimento, cal e soluções alcalinas são as mais comuns globalmente (Abhilash, et al., 2022), além disso, em outras investigações, as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar têm sido utilizadas como alternativa na melhora do solo, nas suas características físicas como a compactação, densificação e estabilidade volumétrica, e características químicas através das reações do agente estabilizante (cimento ou cal) com água (Moraes et al., 2015; Ojeda Farías et al., 2018).

Podemos encontrar uma bibliografia abundante sobre o uso de fibras e materiais vegetais, seu principal uso sempre foi prevenir a retração e trincas de elementos construtivos compactos, como adobes, ajudando a melhorar suas capacidades mecânicas (Yetgin, et al., 2008), encontrando várias investigações relevantes que conseguiram melhorar as propriedades da alvenaria (Sharma, et al., 2015; Araya-Letelier, et al., 2021). No entanto, atualmente o desenvolvimento de técnicas melhoradas de construção em terra, como o BAC, tornou possível buscar soluções incluindo fibras de origens muito diferentes em combinação com outros estabilizantes como CP ou C (Nagaraj, et al., 2014; Taallah e Guettala, 2016; Navarro Mendoza, et al., 2019).

No México, o uso de produtos derivados do cacto opuntia ficus indica, popularmente conhecido como palma, é muito comum na construção civil, tanto na forma de mucilagem quanto de fibras. Uma das formas mais frequentes na região de utilizar a mucilagem é fervendo o cacto e adicionando o líquido às misturas de argamassa, sendo uma solução recomendada pelos órgãos reguladores do patrimônio para intervir e restaurar prédios históricos; com esse método, foram monitorados aumentos na resistência mecânica e alta trabalhabilidade das misturas (Martínez et al., 2008). Além disso, estudos correlativos com outras adições e estabilizantes de uso histórico mostraram um melhor comportamento mecânico em materiais com adição de mucilagem (Alonso et al., 2002).

Neste estudo, sete materiais estabilizantes foram usados para melhorar o comportamento da argila Santiago Undameo em uma amostra de testemunho (AT). Foram utilizados cal (C), cimento Portland (CP), fibra desidratada em pó do cacto opuntia ficus indica (FP), líticos fluviais (LF), líticos vulcânicos (LV), sulfato de sódio (SS) e gesso (G) (sulfato de cálcio semi-hidratado). Para medir as alterações geradas no material analisado, foram realizados testes triaxiais não consolidados não drenados (NN), hidrometria, granulometria e teste de Proctor, tanto para as amostras controle quanto para as misturas melhoradas. A análise das amostras adicionadas de diferentes materiais estabilizantes fornecerá informações relevantes que contribuem para o

aprimoramento das técnicas e uso do barro como elemento construtivo em obras de natureza moderna e conservação do patrimônio edificado.

2. MATERIAIS E METODOLOGIA

As amostras de solo foram obtidas do banco de argila de Santiago Undameo, uma cidade muito próxima à cidade de Morelia, capital do estado de Michoacán, no México. O banco está localizado a 19°42' de latitude norte e 101°11,4' de longitude oeste, às margens da barragem de Cointzio (ver Figura 2), onde são produzidos adobes artesanais e tijolos de barro recozido (ver Figura 3), que dar origem, principalmente, a moradias rurais em comunidades próximas. Após amostragem e retirada das amostras de solo, estas foram transportadas para o laboratório de materiais “Ing. Luis Silva Ruelas” da Faculdade de Engenharia Civil da UMSNH, onde foi realizada a presente investigação.



Figura 2. Localização do banco de materiais em Santiago Undameo (Fonte: Google Earth, 2022).

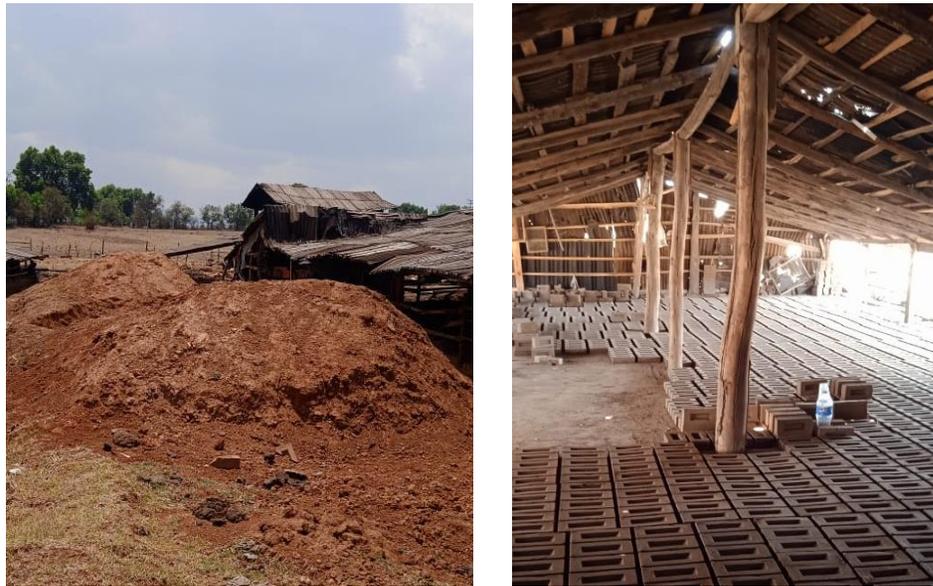


Figura 3. (a) Banco de solo argiloso precursor de Santiago Undameo; (b) Produção e elaboração de componentes construtivos.

Todos os ensaios aqui propostos foram realizados em triplicata. Os testes foram realizados tanto no solo controle como posteriormente nos solos estabilizados. A Tabela 1 mostra os estabilizantes utilizados, bem como a porcentagem em peso utilizada para as misturas projetadas.

Quanto aos líticos, o LF provém do banco "El Cuervo" na cidade de Huajúbaro, no México, coordenadas; longitude (dez): 100,742500, latitude (dez): 19,403333 e 1800 msnm, sendo agregados siliciosos de morfologia arredondada; enquanto o material LV vem do banco "Joyitas", também localizado no estado de Michoacán, coordenadas; longitude (dez): 101,380000, latitude (dez): 19,730000 e 2082 msnm, rodovia Morelia-Quiroga, sendo agregados andesíticos com formato irregular.

É importante destacar que em estudos anteriores foi realizada uma varredura com cada uma das adições com porcentagens de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10% em peso do solo (Flores Rentería, 2010), para encontrar os teores ótimos de cada estabilizador, concluindo que os melhores comportamentos mecânicos foram os indicados na Tabela 1.

Tabela 1. Percentagens dos estabilizadores em peso.

Estabilizadores	% Estabilizante
C	3.0
CP	3.0
FP	0.5
LF	10.0
LV	10.0
SS	0.5
G	6.0

Na presente investigação foram realizados vários ensaios para a caracterização dos solos, que estão representados na Tabela 2. Todos os ensaios foram realizados no laboratório "Ing. Luis Silva Ruelas" da Faculdade de Engenharia Civil, UMSNH.

Tabela 2. Ensaio aplicados na pesquisa e normas seguidas.

Ensaio	Norma
Limites de Consistência e Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)	ASTM D2487-17 ASTM D4318-17
Granulometria	ASTM C136/C136M-19
Hidrometria	ASTM D7928-17
Triaxial não consolidado não drenado (NN)	ASTM D2850-15 UNE-EN ISO 17892-8:2019
Proctor Normal variante A	ASTM D698-12
Granulometria < malha nº 200	ASTM D421-85(2007) W2016
Granulometria > malha nº 200	ASTM D 422-63(2007) W2016

O ensaio triaxial não consolidado não drenado foi realizado com três confinamentos diferentes (σ), para cada uma das misturas estudadas, conforme pode ser observado na Tabela 3. Uma vez que os corpos de prova romperam, eles foram deixados na estufa por 24 horas a aproximadamente 105 +/- 5 °C de acordo com os regulamentos para determinar a umidade.

Tabela 3. Ensaio NN e pressões confinantes aplicadas.

Amostra	Confinamento (kgf/cm ²)
1	$\sigma_3 = 0.3$
2	$\sigma_3 = 0.6$
3	$\sigma_3 = 0.9$

A distribuição granulométrica do solo natural de controle, para partículas retidas na malha ASTM nº 200, foi realizada seguindo a norma ASTM D421-85 (2007) W2016; enquanto o material aprovado na malha ASTM nº 200 foi analisado por meio do teste de sedimentação do hidrômetro, com duração aproximada de uma semana para realização de leituras periódicas conforme a norma ASTM D 422-63 (2007) W2016. Para classificar as amostras de solo argiloso, foi utilizado o SUCS regido pela norma ASTM D-2487-17, sendo este sistema o mais utilizado na prática geotécnica. A resistência ao cisalhamento foi obtida pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb, lei constitutiva do ano de 1773 que permite conhecer a coesão (c) e o ângulo de atrito interno (ϕ).

Por outro lado, para obter os corpos de prova reconstituídos dos testes triaxiais UU, foram adicionados os estabilizantes, homogeneizando e combinando a reconstituição com o Peso Volumétrico Máximo Seco ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e a umidade ótima ($\omega_{\acute{o}pt}$) obtida no teste Proctor. Padrão (variante A). A umidade ótima ($\omega_{\acute{o}pt}$) é o teor de água com o qual se obtém a melhor acomodação das partículas e o índice de vazios mínimo ($e_{m\acute{i}n}$) e também, desta forma, o maior peso volumétrico do material seco, para uma dada energia de compactação, o peso volumétrico correspondente é designado como peso volumétrico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$).

O índice de atividade da argila (A) foi obtido a partir da análise do hidrômetro, (ASTM D 422-63, 2016) usando a expressão (1). A Figura 4 apresenta a variação de A para diferentes argilominerais.

$$A = \frac{IP}{\% \text{ de argila em peso inferior a } 2\mu\text{m}} \quad (1)$$

Onde:

A = atividade de argila

IP = índice de plásticidade

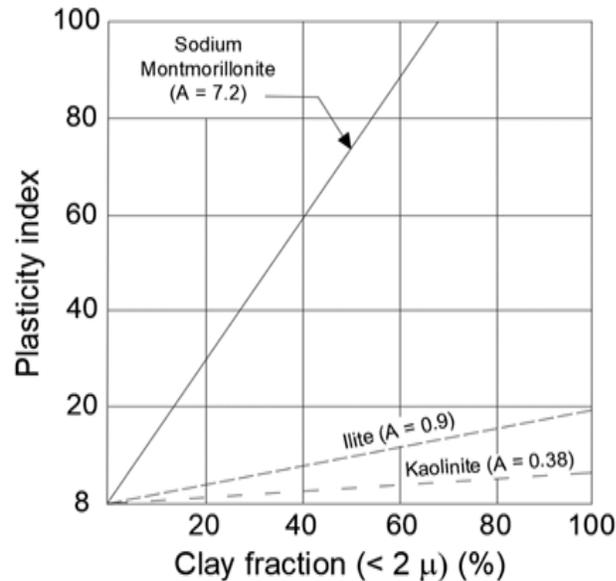


Figura 4. Atividade e correlação entre PI e a porcentagem de fração argila < 2 μm (%). (Skempton, 1953).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste estudo, investigou-se a modificação da envoltória de ruptura em solos argilosos com diferentes estabilizadores volumétricos. Assim, no decorrer da seção seguinte, os resultados obtidos serão analisados e discutidos, primeiramente, analisando os resultados dos ensaios realizados no solo remoldado natural que atuou como controle (AT), posteriormente correlacionando os resultados de as misturas de solo também foram remoldadas e estabilizadas com as sete adições diferentes.

3.1 Análise de amostras de solo de controle

Os resultados dos testes de índice são apresentados na Tabela 4, incluindo umidade (ω), LL, LP, IP, C_{Lin} e C_{Vol} respectivamente.

Tabela 4. Índice de propriedades do solo de Santiago Undameo, México.

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

A Figura 5 mostra os resultados obtidos da granulometria graúda do solo argiloso, realizada por peneiramento do material com malhas ASTM; e a granulometria fina, obtida a partir do teste de sedimentação com o densímetro, em escala semi-logarítmica. Deste último teste obteve-se o A da argila.

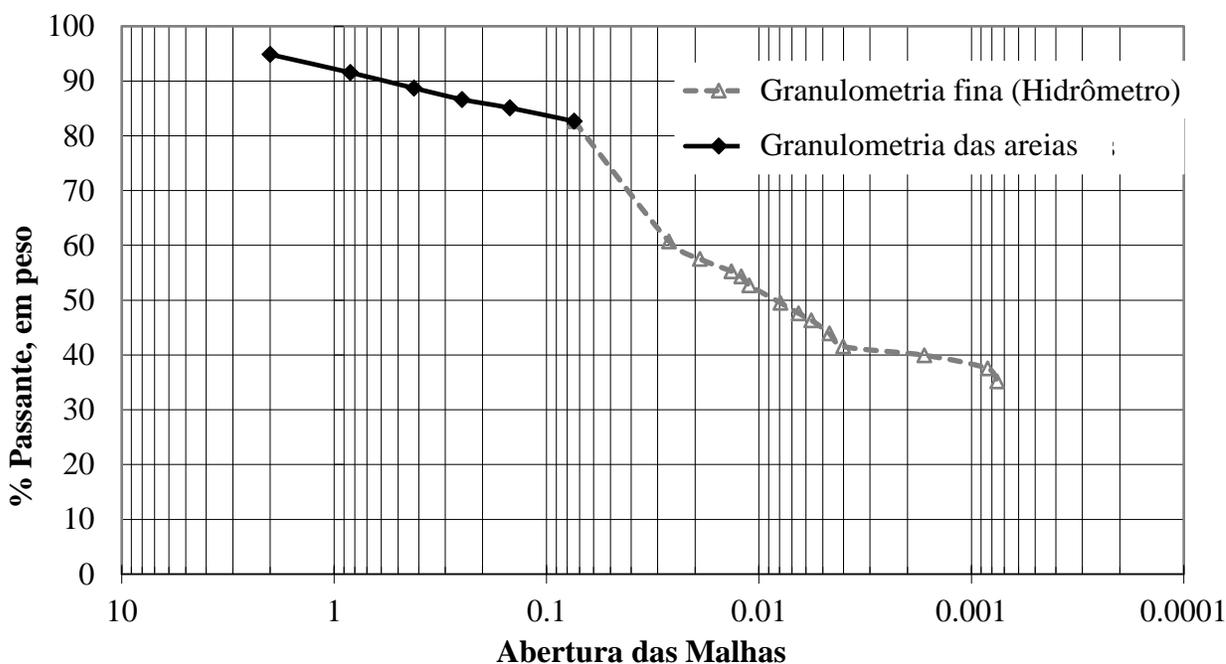


Figura 5. Análise granulométrica combinada de solo gráudo e solo fino da amostra controle.

Pela análise granulométrica, verificou-se que 82% do material passou na malha ASTM nº 200, classificando-o como um solo fino. Além disso, os valores de LL e IP localizaram o material dentro da zona CH, de acordo com a classificação SUCS (ver Figura 6). A análise hidrométrica foi realizada para obter a granulometria fina e determinar A das argilas. A Figura 4 mostra que a porcentagem de material que passa pelo filtro, inferior a $2\mu\text{m}$, é de 40%, o que indica uma quantidade considerável de partículas de tamanho micrométrico, dentro da amostra de solo natural de Santiago Undameo.

Do IP obtido, com valor de 32,7%, obteve-se um A de 0,81 (Expressão 1). Segundo Skempton, o mineral corresponde a uma ilita (ver Figura 4), que possui um A muito menor do que, por exemplo, o caso de uma montmorilonita. As ilitas apresentam inconvenientes para a construção devido à sua tendência ao colapso e às alterações volumétricas que apresentam quando entram em contato com a água, sendo problemáticas para as obras civis (Mirjalili et al., 2020).

3.2 Análise do solo argiloso a argila adicionando os diferentes estabilizantes

Para classificar o solo argiloso (% passante na malha ASTM nº 200) com os diferentes estabilizantes, foi realizado o teste de limites de Atterberg. Os resultados obtidos são apresentados no gráfico de plasticidade da Figura 6, onde a posição do solo não perturbado e das misturas estabilizadas refletem sua classificação de acordo com o sistema SUCS. O solo natural de Santiago Undameo é classificado como CH, coincidindo com os resultados do A apresentados pelo material. Todas as amostras de solo adicionadas estavam localizadas na zona CL, evidenciando a alteração das propriedades proporcionadas pelos estabilizadores; entretanto, a mistura contendo FN ficou muito próxima do limite entre argilas de alta e baixa plasticidade. Por outro lado, a combinação que corresponde ao solo natural com 0,5% de SS adicionado, foi classificada como CL (ver Figura 6), apresentando a maior diminuição no LL de 52,2% da amostra controle para 40,2% (ver Tabela 5).

Nos casos de argilas estabilizadas não patrimoniais (já que, devido à sua disponibilidade, permitem obter mais quantificações do que as amostras patrimoniais), podem-se buscar equações de correlação (Parisi et al., 2020; Vasic et al., 2020) entre os resultados dos diferentes testes físico-

mecânicos (Olacia et al., 2020; Rodríguez et al., 2018; Lan et al., 2020). As equações de correlação permitem estimar parâmetros, seja para validar modelos matemáticos ou para encontrar relações entre variáveis com coeficientes de correlação estatisticamente aceitáveis, sendo úteis para estimar parâmetros em projetos de engenharia onde são utilizados solos argilosos. Existem vários pesquisadores que encontraram equações de correlação entre variáveis do solo e que lhes permitiram propor equações de correlação para fins práticos (Akkaya, Özvan e Özvan, 2019; Chompoorat et al., 2022; Wang et al., 2021; Wu et al. al., 2022).

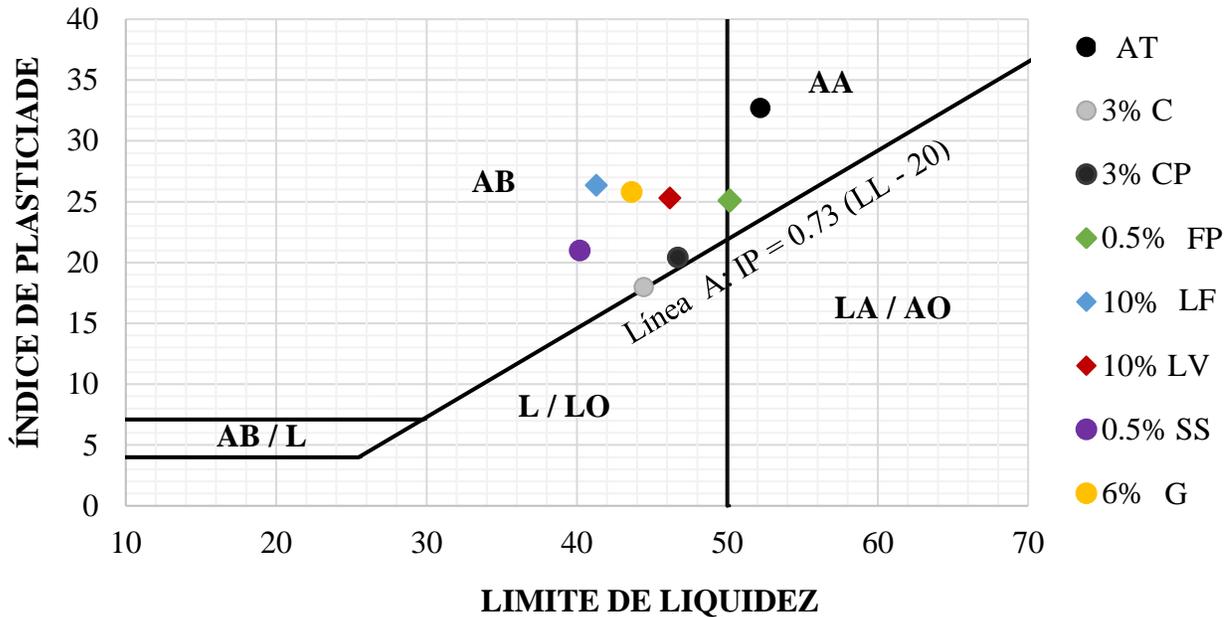


Figura 6. Gráfico de plasticidade e localização das amostras originais e estabilizadas.

Tabela 5. Propriedades de índice do solo e as misturas com os diferentes estabilizantes adicionados.

Material	ω (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	C_{Lin} (%)	C_{Vol} (%)
AT	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% FP	49.38	50.17	25.08	25.09	14.86	54.90
10 % LF	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% G	44.44	43.64	17.84	25.80	12.26	44.72

A Figura 7 mostra o conjunto de propriedades índice de cada uma das misturas estabilizadas e o solo de controle de Santiago Undameo. Na referida figura pode-se observar que os estabilizantes reduzem o teor ótimo de água (ω), o LL e o IP; por outro lado, também provocam um comportamento irregular do LP e do C_{Lin} e C_{Vol} , o que pode corresponder às características particulares de cada adição. Para essas três propriedades índice (LP, CL e IP), os valores obtidos foram tanto maiores quanto menores do que o solo controle.

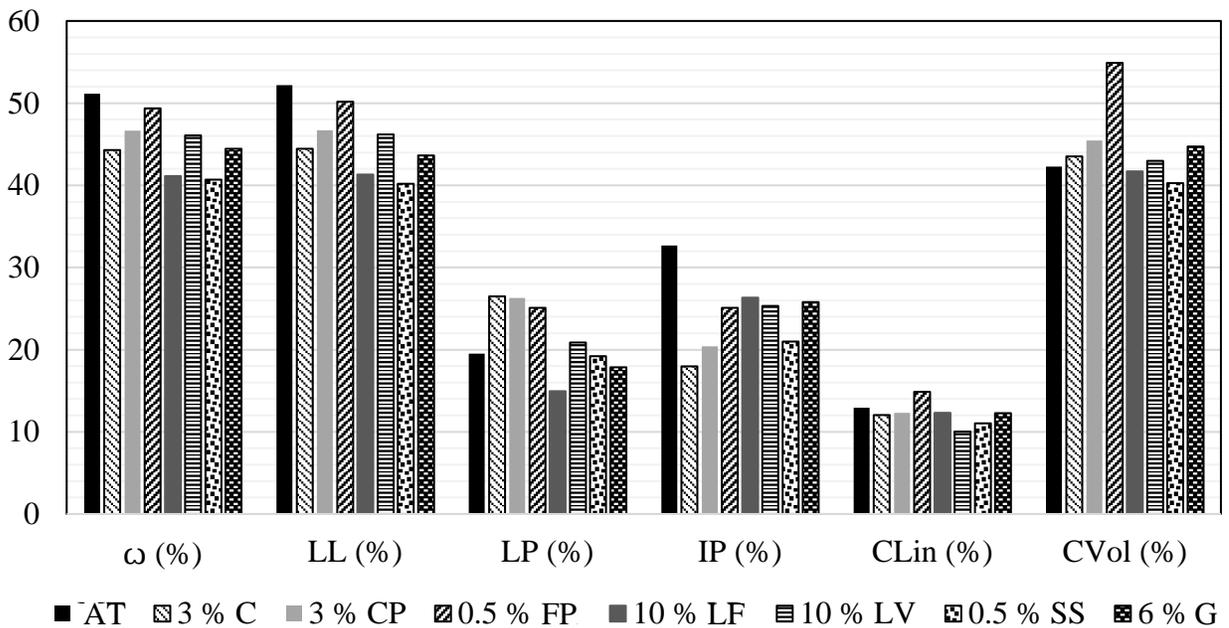


Figura 7. Propriedades de índice do solo de controle e das misturas com os diferentes estabilizantes adicionados.

O ensaio Padrão Proctor determina o teor de água necessário para atingir o peso específico máximo por compactação mecânica (consulte a Figura 8). Neste caso, pode-se observar o efeito dos estabilizadores na quantidade de água necessária e no aumento ou diminuição do peso específico máximo possível. Para este ensaio, a Figura 8 mostra o comportamento da amostra de controle e das misturas estabilizadas em diferentes cores, observando os resultados mais altos para LF e os mais baixos para C. Os teores de água ideais para atingir o peso específico máximo de cada estabilizador são mostrados na Figura 9.

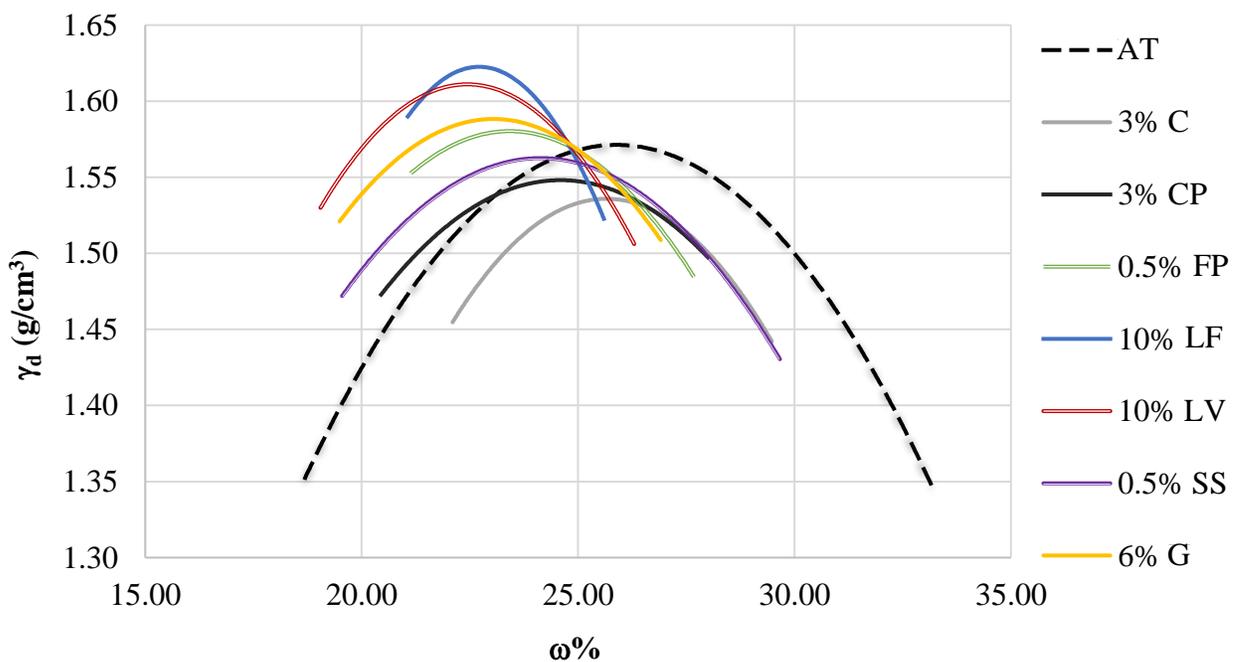


Figura 8. Resultados do ensaio Padrão Proctor (variante A).

A Figura 9 mostra os resultados do Ensaio Padrão Proctor (variante A), permitindo perceber o efeito que os estabilizadores têm em termos do peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e do teor de água ideal ($\omega_{\acute{o}pt}$) para realizar a sua compactação no laboratório. Observando o gráfico, podemos perceber uma clara diminuição do teor óptimo de água com a adição de C, CP e FP; essa diminuição de $\omega_{\acute{o}pt}$ também impacta em um menor $\gamma_{dm\acute{a}x}$, que pode ser atribuído às propriedades de trabalhabilidade e plasticidade que caracterizam esses materiais, sem perder de vista que a água é um lubrificante para a acomodação de partículas, o ótimo corresponderá a o maior valor de $\gamma_{dm\acute{a}x}$. Tanto o CP quanto o C se destacam por manter um certo grau de fluidez por um determinado tempo para facilitar seu uso durante as obras; além disso, esse mesmo comportamento foi observado em misturas de argamassas à base de cal e cimento Portland que incorporam FP (Díaz-Blanco, et al., 2019; Knapen e Van Gemert, 2009; Ramírez-Arellanes et al., 2012).

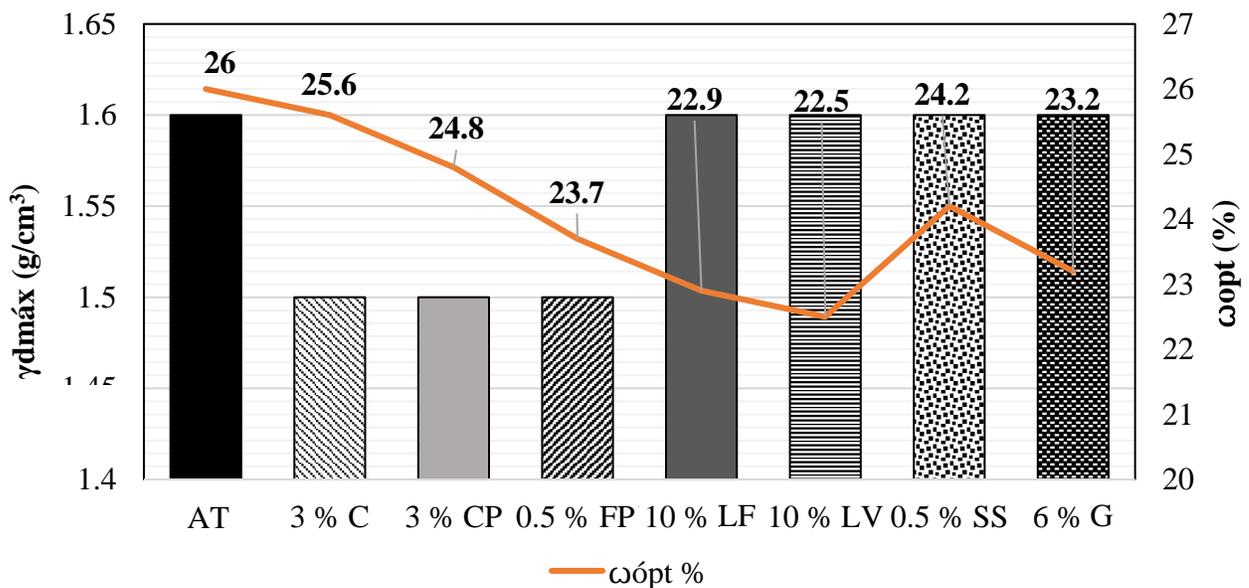


Figura 9. Resultados do ensaio padrão Proctor (Variante A) em função do teor óptimo de água.

Em relação aos líticos utilizados, fica evidente que eles não alteram suas propriedades físicas na presença de água, portanto, não interferem na $\omega_{\acute{o}pt}$; entretanto, diminuem o $\gamma_{dm\acute{a}x}$ da amostra sem adição, o que pode ser atribuído ao seu tamanho de partícula, porosidade e densidade, pois ocupam um volume maior que o solo controle. O SS pode se comportar um pouco como um lítico se a água for adicionada à temperatura ambiente, e sua dissolução na amostra também pode ser mais lenta do que o tempo necessário para executar o ensaio.

A Figura 9 revela pequenas variações do parâmetro $\gamma_{dm\acute{a}x}$ (Miranda, 2017), enquanto as mudanças mais significativas são aquelas que ocorrem com o teor de água ótimo $\omega_{\acute{o}pt}$, com variações muito mais notáveis. Este teor de água também é necessário para obter posteriormente o parâmetro $e_{m\acute{i}n}$.

3.3 Ensaio triaxiais não consolidados não drenados (NN)

Para a realização dos ensaios triaxiais NN, foram utilizados corpos de prova reconstituídos, para os oito casos que consideram o solo natural mais as sete misturas adicionadas. Um total de 144 amostras foram ensaiadas (ver Figura 10).

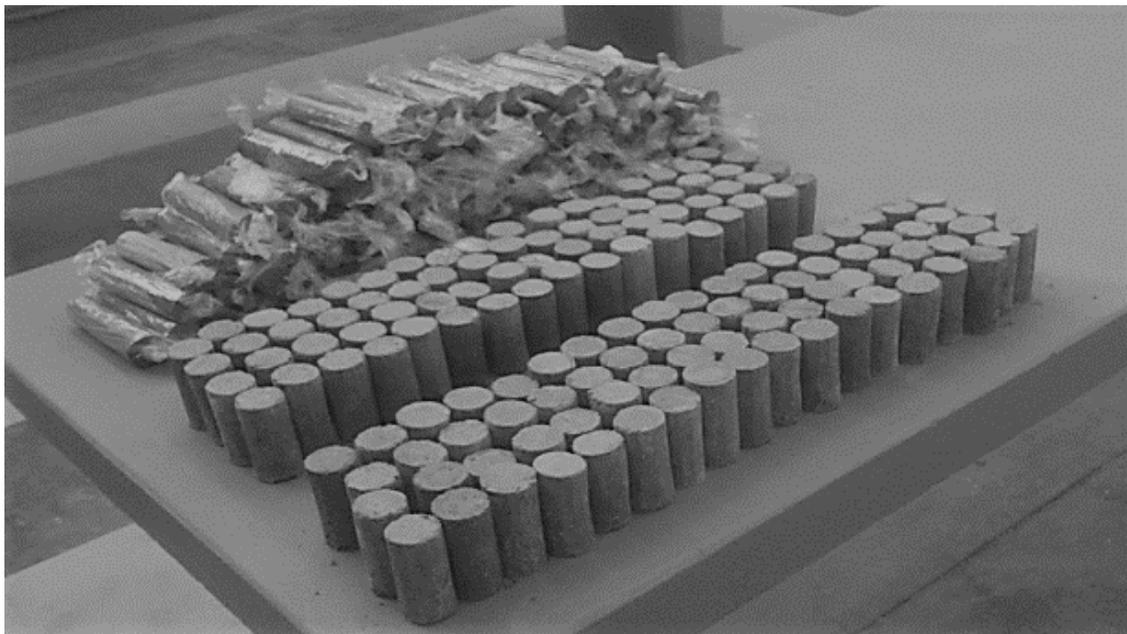


Figura 10. 144 corpos de prova de solos argilosos com diferentes estabilizantes para o ensaio triaxial NN (Miranda, 2017).

Na Figura 11 podemos observar a correlação entre Deviating Stress (σ) e a Deformação unitária (ϵ), dados que indicam o tipo de falha obtido para cada uma das combinações entre o solo argiloso controle e seus estabilizadores. As amostras que apresentaram melhora em sua plasticidade (AB) apresentaram alterações em seu comportamento expansivo. Esse comportamento das misturas é muito significativo, pois pode melhorar esses materiais e ter um impacto muito positivo no seu uso para aplicações na construção civil, estabilizantes podem ser usados em campo entre muitos outros usos.

Praticamente todas as misturas melhoraram seu comportamento em termos de tensão de compressão e deformação. Fica evidente que a mistura com 6% G como estabilizante melhora o material ao enrijecê-lo e aumentar sua resistência à compressão, isso é observado por apresentar uma maior inclinação na curva descrita por este material.

A estabilização do solo com gesso não é muito comum na prática e as informações sobre seu comportamento são muito limitadas, porém, com os resultados apresentados, demonstra uma certeza em seu uso, mas sabe-se que o gesso é solúvel em água, portanto o que requer cuidadosas medidas de proteção. Abaixo das misturas com G, as misturas com C, LF e CP, que são materiais muito utilizados na estabilização do solo e esperava-se uma melhora no material, como por exemplo no caso das misturas com C, quando a reação de cal e água ocorre, o solo diminui sua permeabilidade e aumenta a capacidade de carga em poucas horas, formando finalmente uma camada estrutural forte e flexível (Reginaldo et al., 2018).

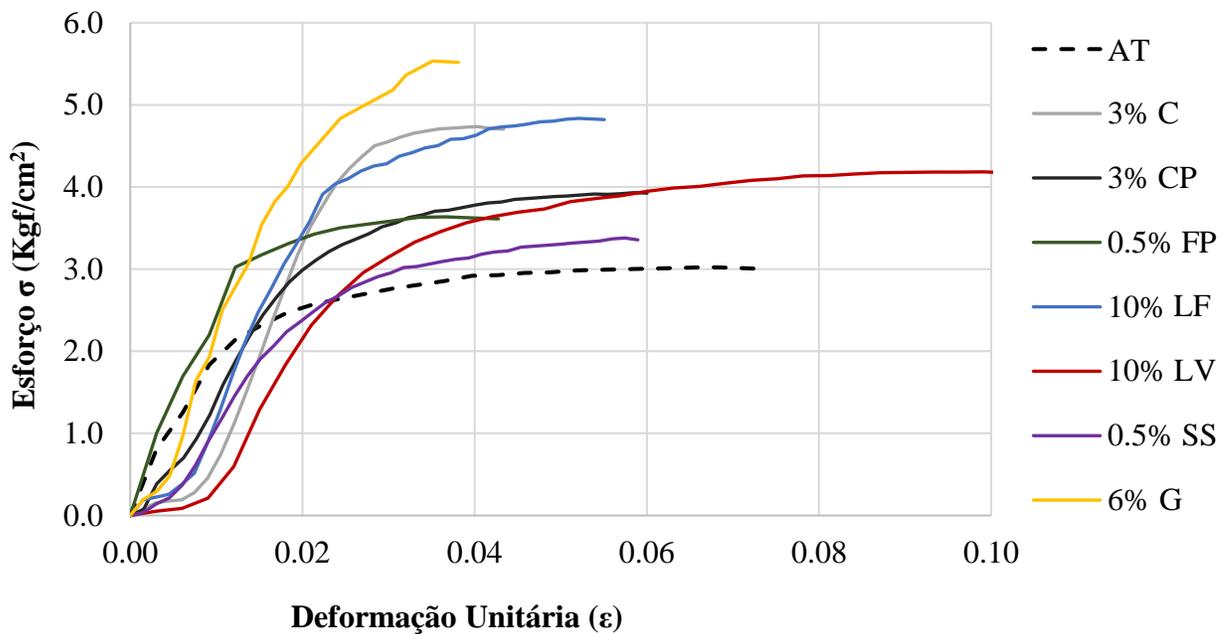


Figura 11. Curvas de tensão do desviador σ - deformação unitária ϵ .

A Figura 12 mostra um exemplo da envoltória de ruptura, utilizando pelo menos 3 círculos de Mohr para conhecer a tendência da linha da envoltória e, com isso, calcular a coesão (c) e o ângulo de atrito interno (φ).

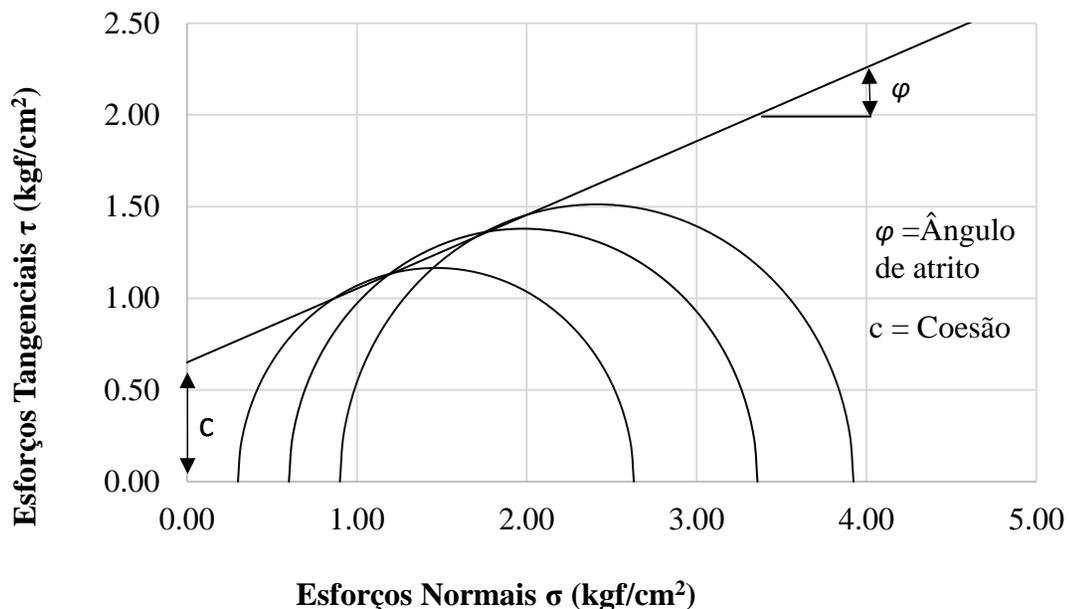


Figura 12. Envoltória de ruptura obtido para o solo natural, obtendo $c = 0,65 \text{ kgf/cm}^2$ e $\varphi = 22^\circ$.

Para simplificar a observação das envoltórias de ruptura e a sua representação gráfica, apresentase a figura 13 com o resumo dos resultados dos solos argilosos adicionados dos diferentes estabilizantes, sem colocar os respectivos círculos de 3 Mohr que deram origem ao envoltório.

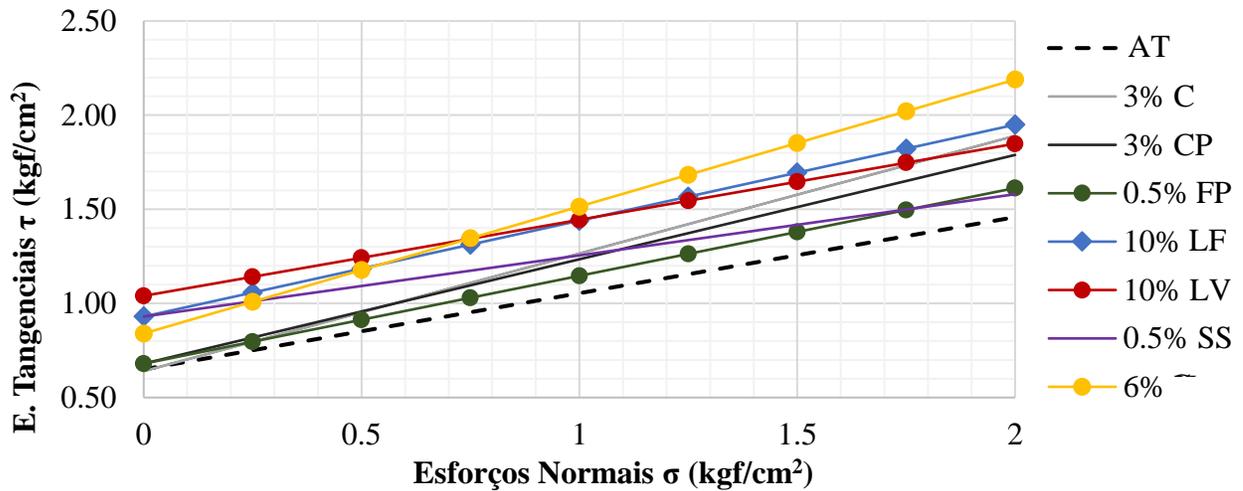


Figura 13. Comparação das envoltórias de ruptura do solo argiloso de Santiago Undameo, natural (Controle) e com estabilizadores.

A Figura 14 mostra como todos os estabilizadores usados melhoram a coesão em maior ou menor grau. A variação do nível de melhoria da coesão (c) depende das características particulares de cada estabilizador em relação a essa matéria-prima ou solo argiloso natural. Neste ensaio, destacaram-se principalmente LF, LV, SS e G. Em relação ao ângulo de atrito interno (ϕ), observa-se um comportamento inversamente proporcional ao apresentado pela coesão, visto que os melhores resultados correspondem a C, CP e G, esses três estabilizadores são materiais que reagem quimicamente com a água e formam novas fases mineralógicas mecanicamente mais resistentes, o que impacta positivamente no valor de ϕ . O fato de G ter impacto positivo em ambas as variáveis é muito interessante, sendo o único estabilizador com esse comportamento.

Vale ressaltar que o aumento do ângulo de atrito interno é mais significativo que o aumento da coesão, sendo especialmente apreciado e favorável para os usos dos solos utilizados na construção civil. Isso se deve ao fato de que a resistência mecânica pode variar facilmente quando se adiciona água às partículas do solo, de modo que a capacidade de resistência se torna mais importante devido à união entre as partículas do solo argiloso.

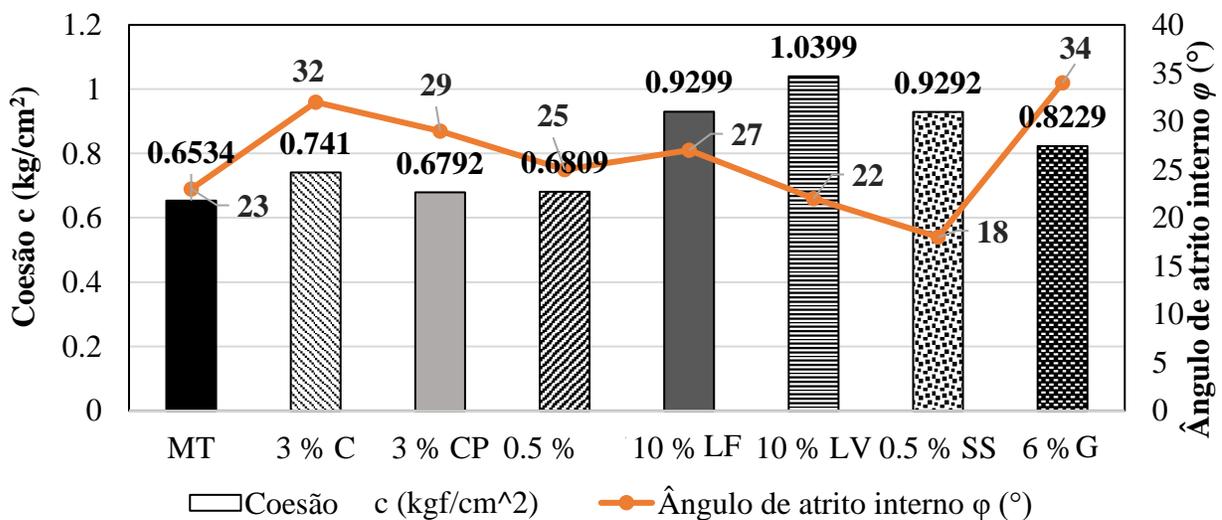


Figura 14. Valores de coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ) da amostra controle e das misturas com diferentes estabilizantes.

4. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados correspondem e se limitam ao estudo dos solos argilosos de Santiago Undameo, em Michoacán, México. É importante notar que qualquer extrapolação para material de estudo semelhante deve ser cuidadosa e baseada em experimentação direta. A metodologia desenvolvida neste trabalho e o grau de inovação dos ensaios quanto ao conhecimento desses materiais podem ser muito úteis em aplicações relacionadas à construção e restauração de imóveis. Ao melhorar um solo, apresenta-se um impacto positivo no nosso ambiente, uma vez que é possível obter benefícios ambientais e econômicos, por exemplo, os custos de transporte dos materiais aumentam substancialmente com a distância a que se encontra o local de exploração; é permitido, com a estabilização, que os materiais que não atendem aos requisitos das normas, como é o caso mais frequente dos materiais encontrados in situ, atinjam a resistência necessária para que seu desempenho, dentro da estrutura do pavimento, seja satisfatório; ou que se consiga um melhor comportamento destes materiais, reduzindo a espessura das estruturas do pavimento a construir, o que implica que os orçamentos para obras de pavimentação sejam significativamente reduzidos e que as pedreiras ou bancos de materiais sejam menos explorados.

As envoltórias de ruptura da amostra original (solo natural remodelado não estabilizado) permitiram determinar a variação do esforço máximo suportado, obtendo a coesão (c) e o ângulo de atrito interno para cada caso (ϕ), sendo esta a principal contribuição da pesquisa.

Os resultados obtidos mostraram que seis dos estabilizantes adicionados ao solo argiloso de controle modificam sua classificação SUCS, passando de AA para AB. A amostra adicionada com 3% C (hidróxido de cálcio) apresentou melhores resultados em relação às demais amostras adicionadas, pois a mistura estava localizada próxima à linha limite entre silte e argila com baixa plasticidade. Por outro lado, FP não apresentou grandes alterações nas propriedades do material, colocando-o no limiar entre alta plasticidade e baixa plasticidade. Os estabilizadores proporcionam muitas outras alterações nas propriedades do solo, no entanto, a plasticidade é uma das mais importantes, devido aos problemas explicados anteriormente apresentados pelas construções de terra, infraestrutura e edifícios patrimoniais.

Com as envoltórias de ruptura, observou-se uma mudança na coesão c e no ângulo de atrito ϕ , resultando em aumento da resistência mecânica de algumas misturas. Os estabilizadores que favoreceram maior atrito entre as partículas do solo (maior ϕ) correspondem a G, C, CP, LF e FP. Ao contrário, o LV não proporciona aumento nas propriedades mecânicas, resultando em um ângulo de atrito (ϕ) muito semelhante ao do solo natural; além disso, a SS também não teve muito sucesso nessa tarefa.

A adição de alguns estabilizantes garante um aumento significativo nas propriedades mecânicas dos solos expansivos. Para o caso particular da argila em Santiago Undameo, a adição de C e G como estabilizantes mostrou melhorias nas propriedades físicas e mecânicas. Esses estabilizadores reduzem a plasticidade e melhoram a trabalhabilidade do material, sendo uma propriedade muito atrativa para usos em construção e restauração com mínimas alterações estéticas e colorimétricas. Os dois materiais (C e G) requerem menos energia do que outros estabilizantes industriais para sua produção, por isso têm menor impacto ambiental e são mais sustentáveis.

No caso dos adobes para a conservação do patrimônio vernacular mexicano, com problemas de sobrevivência e dificuldades de estabilização com materiais históricos tradicionais, mostra-se que a cal continua a ser a melhor opção para a estabilização da argila, em contraste com a CP. No entanto, este último tem demonstrado sua utilidade para outros fins, como a produção de BAC, uma tecnologia de construção de baixo impacto que pode atingir considerável resistência mecânica e que apresenta melhor comportamento na presença de água devido ao seu processo de compactação.

Por fim, pode-se concluir que as sete adições propostas, quando analisadas em laboratório sob as normas internacionais ASTM, melhoraram o comportamento do solo altamente plástico, reduzindo deformações lineares e volumétricas e aumentando a resistência mecânica e o ângulo de atrito interno dos solos argilosos adicionados. A investigação contribui favoravelmente para a melhoria dos solos argilosos utilizados na recuperação de construções de terra de patrimônio histórico, obras civis, problemas patológicos em edifícios e tecnologias de construção.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordinación de la Investigación Científica y del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” da Faculdade de Engenharia Civil, da UMSNH; do CONACYT com o Proyecto Pronaces 321260 e o Programa de Becas Nacionales; da SEP, Secretaría de Educación Pública em seus programas Prodep/Promep; bem como o inestimável apoio técnico dos Engenheiros O. S. Miranda Leal, F. J. Jerónimo Rodríguez, J. I. Bocanegra Torres e P. García Díaz nas quantificações mecânicas, e LANCIC-UNAM na microcaracterização do material.

6. REFERÊNCIAS

- 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., Thepumong, 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), “*Envoltante 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.ijbsbe.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>