

MELHORAMENTO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO ESTABILIZADO COM CINZA DA LENHA DE ALGAROBA

IMPROVEMENT OF THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF A SOIL STABILIZED WITH MESQUITE WOOD ASH

MEJORA DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN SUELO ESTABILIZADO CON CENIZA DE MADERA DE MEZQUITE

Luana Dantas de Medeiros

Doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande-PB, Brasil, luanadantas.engenheira@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9893-2428>

Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello

Doutora em Engenharia Civil, Docente Permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Caruaru-PE, Brasil, isabelamcvbello@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3072-7836>

Silvio Romero de Melo Ferreira

Doutor em Engenharia Civil, Docente Permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia (PPGEC) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife-PE, Brasil, silvio.mferreira@ufpe.br, <https://orcid.org/0000-0002-5760-1494>

RESUMO: Quando o solo não apresenta propriedades adequadas para suportar as cargas impostas, pode-se realizar seu melhoramento para satisfazer os requisitos de projeto. Este artigo tem como objetivo verificar o comportamento mecânico de um solo coletado da cidade de Agrestina, Pernambuco, estabilizado com diferentes percentuais de cinza de lenha de algaroba (CLA). As misturas foram realizadas com 4%, 6%, 8% e 10% de CLA em relação à massa da amostra para avaliar a evolução da estabilização em diferentes tempos de cura (0,7,14 e 28 dias). Foram realizados ensaios de caracterização (física, química e mineralógica) e ensaios mecânicos no solo e nas misturas de solo-CLA. Nos ensaios mecânicos foram investigados a resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração por compressão diametral (RTCD) e cisalhamento direto (CD). Os resultados mostraram aumento na resistência em decorrência do aumento do teor de CLA e o tempo de cura, em função da cimentação que ocorre nas misturas. No ensaio de RCS, o aumento foi de 228% do solo com 10% de CLA e 28 dias de cura. No ensaio de RTCD o aumento foi de 314%, e no ensaio de resistência ao cisalhamento, a coesão aumentou em decorrência do tempo de cura e aumento dos teores de CLA. O ângulo de atrito não apresentou uma tendência definitiva. Os resultados mostram CLA como alternativa para melhoria do comportamento mecânico de solo, também reduzindo um passivo ambiental.

Palavras-chave: Compressão simples; Compressão diametral; Cisalhamento direto.

ABSTRACT: When the soil does not have adequate properties to withstand the imposed loads, it can be improved to meet the design requirements. This article aims to verify the mechanical behavior of soil collected from the city of Agrestina, Pernambuco, stabilized with different percentages of mesquite wood ash (MWA). The mixtures were made with 4%, 6%, 8% and 10% CLA in relation to the mass of the dry sample to evaluate the evolution of the stabilization at different curing times (0, 7, 14 and 28 days). Characterization tests (physical, chemical and mineralogical) and mechanical tests were performed on soil and soil-CLA mixtures. The mechanical tests investigated the simple compressive strength (SCS), diametrical compression tensile strength (DCTS) and the direct shear (CD). The results showed an increase in strength because of the increase in CLA content and curing time, due to the cementation that occurs in the mixtures. In the UCS test, the increase was 228% of the soil with 10% CLA and 28 days of curing. In the RTCD test, the increase was 314%, and in the shear strength test, cohesion increased because of the curing time and the increase in CLA content. The friction angle did not show a definite trend. The results show that CLA can be used to improve the mechanical behavior of soil, also reducing an environmental liability.

Keywords: Simple compression; Diametral compression; Direct shear

RESUMEN: Cuando el suelo no tiene propiedades adecuadas para soportar las cargas impuestas, puede ser mejorado para cumplir los requisitos de diseño. Este artículo tiene como objetivo verificar el comportamiento mecánico del suelo recolectado en la ciudad de Agrestina, Pernambuco, estabilizado con diferentes porcentajes de ceniza de madera de mesquite (CMM). Las mezclas se realizaron con 4%, 6%, 8% y 10% de CLA en relación a la masa de la muestra seca con el fin de evaluar la evolución de la estabilización a diferentes tiempos de curado (0, 7, 14 y 28 días). Ensayos de caracterización (física, química y mineralógica) y ensayos mecánicos del suelo y de las mezclas suelo-CLA. Los ensayos mecánicos investigaron la resistencia a la compresión simple (RCS), la resistencia a la tracción por compresión diametral (RTCD) y la de cizalladura directa (CD). Los resultados mostraron un aumento de la resistencia como consecuencia del aumento del contenido de CLA y del tiempo de curado, debido a la cementación que se produce en las mezclas. En la prueba RCS, el aumento fue del 228% del suelo con un 10% de CLA y 28 días de curado. En el ensayo RTCD, el aumento fue del 314%, y en el ensayo de resistencia al cizallamiento, la cohesión aumentó como consecuencia del tiempo de curado y del aumento del contenido de CLA. El ángulo de fricción no mostró una tendencia definida. Los resultados muestran que el CLA se puede utilizar para mejorar el comportamiento mecánico del suelo, reduciendo también el pasivo medioambiental.

Palabras clave: Compresión simple; Compresión diametral; Cizallamiento directo.

1. INTRODUÇÃO

A estabilização do solo é utilizada para melhorar as propriedades físicas, ou seja, a permeabilidade, a plasticidade, capacidade de suporte, estabilidade e durabilidade do solo (ROSALES et al. 2020). Há muitas soluções disponíveis para se realizar a estabilização dos solos e com isso evitar futuros problemas nas construções, como, por exemplo, estabilização física, química e mecânica (AZEVEDO, 2010).

Verifica-se uma grande preocupação em se realizar a estabilização do solo, de maneira que ele possa resistir a todos os esforços a ele solicitados (ALBUQUERQUE et al., 2020). Entretanto, para que sejam utilizados novos materiais, é necessário conhecer as propriedades mecânicas, físicas e químicas, assim como suas possíveis combinações. O entendimento do processo de estabilização é de grande importância no que diz respeito ao seu comportamento mecânico, por depender de vários aspectos relacionados com o solo e os aditivos, como a granulometria, teor de umidade, densidade e composição química (VIZCARRA, 2010).

Ao longo dos anos, vem-se estudando materiais alternativos para estabilização de solo, como cinzas geradas por algum processo produtivo como, cinza de casca de arroz (SILVA, 2018; CONSTANTINO, 2018), cinza de serragem (DINESH; INDHUMATHI; PICHUMANI, 2021), cinza do bagaço de cana-de-açúcar (LIMA et al., 2022), cinza de resíduo sólidos da saúde (ALENCAR, 2022).

A cinza de lenha de algaroba (CLA) é gerada pelo processo de queima da lenha de algaroba para o aquecimento de água nas lavanderias situadas no agreste Pernambucano. São descartadas inadequadamente, ocasionando sérios problemas ambientais. Diversas pesquisas foram realizadas sobre o uso CLA (SANTOS, 2014; CAVALCANTI, 2016; MELO, 2018; NASCIMENTO et al., 2019; LIMA, 2019), a maioria das pesquisas trata do uso da CLA em concretos e argamassas, para substituição de cimentos e cal, que são aditivos que são bastante utilizados para realizar a estabilização de solos. Entretanto, não existe pesquisa sobre adição da CLA para o melhoramento das propriedades físicas e mecânicas do solo.

Este artigo apresenta uma análise do comportamento mecânico de um solo coletado na cidade de Agrestina, Pernambuco, utilizando vários teores de CLA nas misturas de solo-CLA e diferentes tempos de curas. Ensaios de caracterização (física, química e mineralógica) e ensaios mecânicos de resistência à compressão simples (RCS), de tração por compressão diametral (RTCD) e de cisalhamento direto (CD) foram realizados na CLA, no solo e nas misturas de solo-CLA. Trata-se de uma pesquisa pioneira no Brasil quanto ao uso da CLA como aditivo para melhoramento de solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de estudo

O município de Agrestina situa-se a 149 km da capital Pernambucana (Figura 1), possui uma população com 22.679 habitantes, área territorial de 200.369 km² e um bioma de Caatinga e Mata Atlântica (IBGE, 2022).

De acordo com o mapa de susceptibilidade à expansão dos solos no estado de Pernambuco (AMORIM, 2004), Agrestina apresenta potencial de expansão, entretanto é considerado baixo. No Mapa Exploratório-Reconhecimento de solos do estado de Pernambuco (EMBRAPA, 2024), observa-se que no município de Agrestina possui grande quantidade de solos do tipo Planossolos Háplico (SX), e também apresenta o Neossolo Regolítico (RR) e Argilossolo Vermelho-amarelo (PVA) (Figura 2).

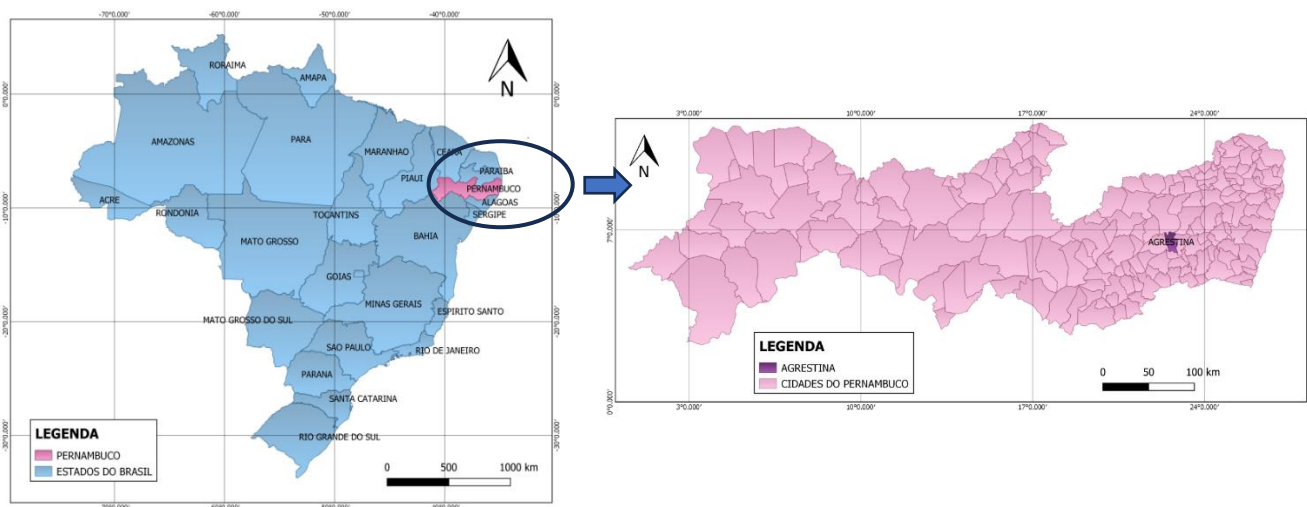


Figura 1 - (a) Localização da Cidade de Agrestina no estado de Pernambuco. Fonte: Os autores (2023).

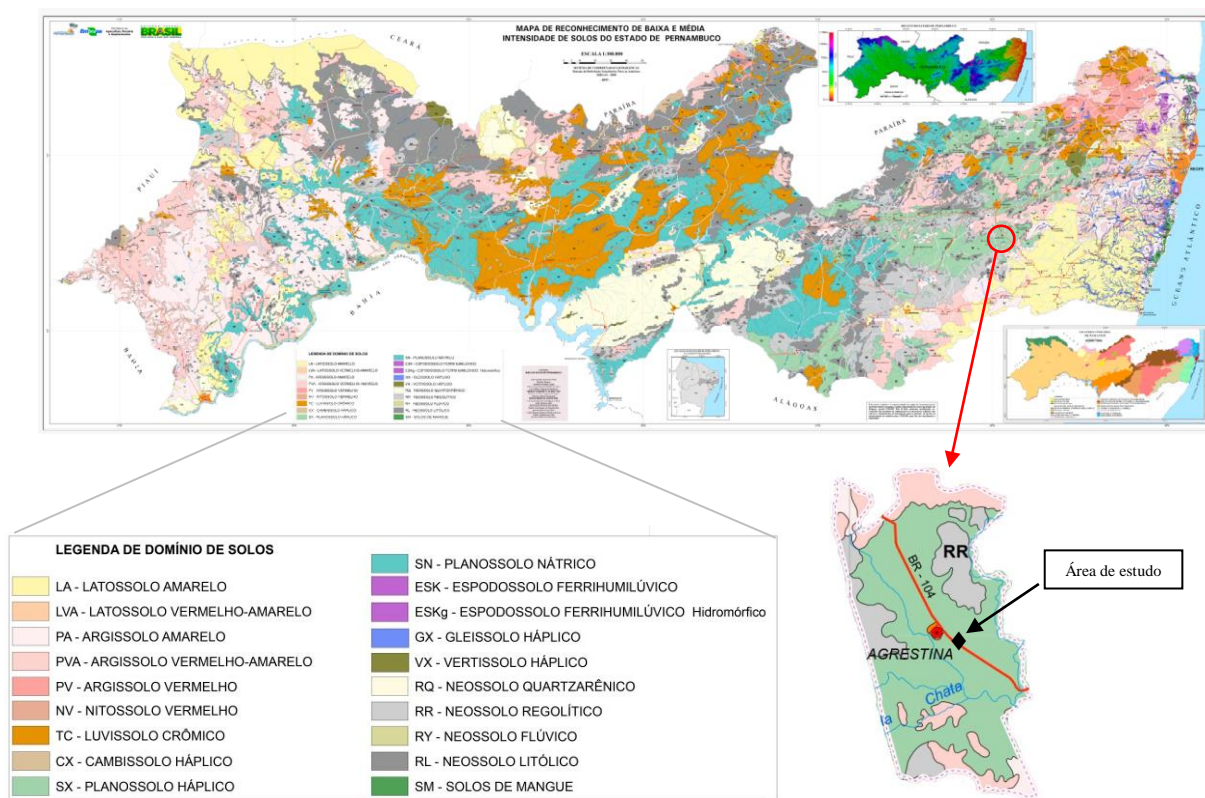


Figura 2 - Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Município de Agrestina. Fonte: Adaptado de AGEITEC (2024).

Normalmente, o Planossolos Háplicos são solos com características que pode ser carbonáticos, sálicos e alumínicos com camada ou camadas dentro de 150cm contanto a partir da superfície. Tem-se também os Planassolos Háplicos Distróficos que apresenta a saturação por bases menor que 50% e Eutróficos com saturação maior ou igual a 50%. Os Argissolos Vermelho-Amarelos, solos alumínicos que possui ou não argila com alta atividade nos primeiros 100cm do horizonte B, podendo ser também Distróficos e Eutróficos da mesma forma que os

Planossolos Háplicos. Os Neossolos Regolíticos, são solos carente de contato lítico ou lítico fragmentário entre a superfície e 50cm no horizonte A ou lítico subjacente ao horizonte C ou Cr. Sanciona um horizonte B no início de sua formação, do qual a espessura da camada não cumpre a nenhum diagnóstico tipo de horizonte B (SANTOS *et al.*, 2018).

Em Agrestina o clima é tropical, ou seja, região com elevadas temperaturas e alternância entre estações de seca e chuvosa. No mês de novembro teve-se uma precipitação de 9.3 mm, que é o período mais seco, já no mês de junho a média foi de 123.4 mm, apresentando uma variação de 114.1 mm entre mês mais seco e o mais chuvoso, conseqüentemente uma pluviometria que varia consideravelmente ao longo do ano. O levantamento de dados foi realizado entre janeiro a dezembro de 2023 em Weatherspark (2023). As temperaturas possuem uma variação média de 5 °C, onde a maior temperatura média registrada foi de 27°C no mês de dezembro, e a menor de 22 °C no mês de julho (WEATHERSPARK, 2023).

2.2 Programa experimental

No início do programa experimental foram coletadas amostras deformadas, realizados os ensaios de caracterização física da CLA, do solo e das misturas de solo-CLA, seguindo as normas vigentes. Na Figura 3 tem-se o fluxograma das etapas adotadas na pesquisa. Através do ensaio de compactação, obteve as umidades ótimas do solo, da CLA e de cada mistura para assim realizar a preparação dos corpos de prova para os ensaios mecânicos. Para os ensaios RCS e RTDS, os corpos de prova foram ensaiados com as idades de 0, 7, 14 e 28 dias, e para os ensaios CD nas idades de 0, 14 e 28 dias.

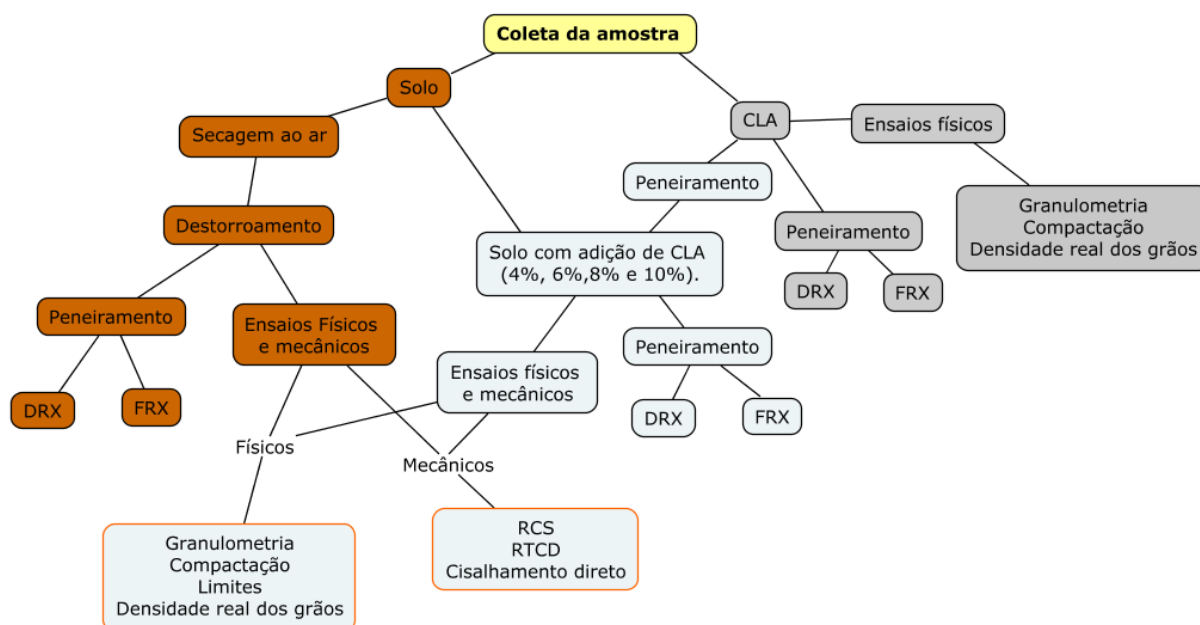


Figura 3 - Fluxograma das etapas experimentais. Fonte: Os autores (2023).

2.2.1 Coleta das amostras de solo e CLA

Silva (2018), a partir de estudo realizado no mesmo local, verificou um perfil pedológico composto por 3 horizontes. Os horizontes A e B, ambos com 0,4m de espessura, compostos por um solo mais solto e um solo mais resistente, respectivamente. Apresentam características granulométricas e Limites de Atterberg próximos, sendo considerado como um solo residual. O horizonte C, com 1,0m de espessura, é predominantemente grosso e classificado como

saprolítico, com fortes indícios de decomposição da rocha sã no local, e, portanto, mais resistente que os demais horizontes. De acordo com o DRX, há a presença de Caulinita, Montmorilonita, Vermiculita e Mica nos horizontes.

Para a presente pesquisa, foram coletados 250 kg de amostra em saco do solo superficial, camada acima do horizonte A no mesmo lugar em que Silva (2018) coletou suas amostras. De acordo com o Mapa de Reconhecimento apresentando na Figura 2, trata-se de Planossolo, o solo mais encontrado no município.

A CLA foi fornecida pela LGN Lavanderia, localizada no Sítio Cachoeira Seca, Caruaru-PE. Essa lavanderia utiliza apenas a madeira de Algaroba e não uma mistura de madeiras, onde a lenha da algaroba passa por um processo de queima a uma temperatura média de 200°C. A CLA permanece armazenada no local em sacos, a espera da coleta para o descarte. As cinzas foram preparadas no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) – UFCG, campus de Campina Grande. Para a realização das misturas do solo-CLA passou pelo processo de peneiramento na peneira número 200 (0.075mm), para a retirada dos vestígios de carvão, para que pudessem promover o efeito fíler no sistema.

2.2.2 Descrição dos ensaios

O solo seco foi misturado com porcentagens de 4%, 6%, 8% e 10% de CLA em relação ao peso da amostra seca para avaliar a evolução da estabilização. A escolha das porcentagens se deu em decorrência dos estudos com acréscimos de cal e cinzas realizados por Constantino (2018), Lacerda (2019), Paiva et al. (2016); Silva; Bello; Ferreira (2020).

As amostras foram preparadas seguindo as recomendações da ABNT, NBR 6457/2016. Na Tabela 1 são apresentados os ensaios realizados, a quantidade de amostras e as normas que foram utilizadas para executar cada um deles. Na quantidade de amostras está incluído o solo, CLA e as misturas de solo-CLA.

Tabela 1 - Ensaios realizados, quantidade de amostras e as normas

Caracterização	Ensaio	Amostras	Normas
Física	Granulometria e sedimentação	6	NBR 7181/2016
	Limites de Liquidez	6	NBR 6459/2016
	Limite de plasticidade	6	NBR 7180/2016
	Densidade Real dos grãos	6	NBR 6458/2016
	Compactação	6	NBR 7182/2016
Química	FRX	6	-
Mineralogia	DRX	6	-
Mecânica	RCS	60	NBR 12025/2012
	RTCD	60	NBR 7222/2011
	Resistência ao cisalhamento direto	45	ASTM D 3080/2011

Fonte: Autores (2023)

A caracterização granulométrica do solo, da CLA e das misturas foi realizada através do peneiramento grosso e fino, e a fração de finos das amostras realizou-se os ensaios de sedimentação com defloculante. A classificação do solo foi realizada através do sistema unificado (SUCS) é realizada através de uma carta de plasticidade em que são inseridos os valores de LL e IP (ASTM 2487, 2017) e também pelo sistema de classificação Highway Research Board (HRB) ou TRB (Transportation Research Board), o qual considera a granulometria, limite de liquidez, índice de plasticidade e o índice de grupo.

A identificação química do solo, da CLA e das misturas do solo com a cinza foi realizada através da análise da difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX). O ensaio FRX foi realizado para a cinza pura, o solo natural e as misturas de solo com CLA, nas diferentes porcentagens. Os resultados da varredura semi-quantitativa foram recalculados após a incorporação do valor de perda ao fogo e umidade. O ensaio de DRX foi realizado com o emprego do Difractômetro de Raios – X, utilizando o equipamento Rigaku modelo MiniFlex 600, com radiação Tubo de Cu K (alfa), tensão de 40 KV, corrente de 25 mA, com passo de 0,020U, com incremento a cada 1s e velocidade de varredura de 2°/min, varrendo o intervalo da angulação de 3° a 42°, utilizando o método convencional (pó seco).

Para a caracterização mecânica das misturas foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples (RCS), de resistência à tração por compressão diametral (RTCD), e o ensaio de cisalhamento direto (CD). Para os ensaios de RCS e RTCD foi utilizado um molde cilíndrico de 100mm de altura e 50 mm de diâmetro. Para cada teor de CLA, tempo de cura e tipo de ensaio, foram moldados 6 corpos de prova idênticos e depois pesados, embalados, devidamente numerados e levados à câmara úmida durante o período de cura. No total foram moldados 60 corpos de prova para o ensaio RCS e 60 para os ensaios RTCD.

Para o ensaio de cisalhamento direto foi utilizado molde de 60 mm de largura, 60 mm de comprimento e 20 mm de espessura. Para cada teor de CLA, tempo de cura e tensão normal que será aplicada no ensaio (50, 100 e 200 kPa), foram moldados 3 corpos de prova idênticos e depois pesados, embalados, devidamente identificados e levados à câmara úmida para reduzir a perda do teor de umidade durante os tempos de cura. No total foram moldados 60 corpos de prova, assegurando o peso específico máximo aparente e umidade ótima.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização do solo

O solo natural apresenta-se bem graduado, com aproximadamente 53% de finos, contendo 23,4% de argila, 30% de silte e 46,66% de areia. A fração de areia é composta por 35,10% de areia fina, 11,32% de areia média, 0,21% de areia grossa e 0,03% de pedregulho. A curva de compactação é obtida com pequenos acréscimos de umidade a partir do solo seco ao ar, através da energia normal. A forma obtida através da curva apresenta pico único de acordo com a classificação de Lee e Suedkamp (1972) é do tipo A. Através dela tem-se a umidade ótima de 14,30% e peso específico aparente seco 18,43 kN/m³. A umidade do solo foi de 14,30%, limite de liquidez (LL) de 28%, limite de plasticidade (LP) de 20%, índice de plasticidade (IP) de 8% e peso específico dos grãos, γ_s de 26,80 kN/m³.

A classificação do solo através do sistema unificado (SUCS) é realizada através de uma carta de plasticidade (ASTM 2487, 2017). Logo o solo pode ser classificado como uma argila de baixa plasticidade (CL) ou um solo orgânico de baixa plasticidade (OL). Entretanto, pela proximidade com o outro grupo, ele também pode ser classificado como ML (silte de baixa plasticidade), conseqüentemente, olhando para a curva granulométrica o solo apresenta uma maior porcentagem de silte do que de argila.

Outro sistema de classificação de solos bastante utilizado é Highway Research Board (HRB) ou TRB (Transportation Research Board). O solo apresentou 53% de finos, ou seja, granulometria que passa pela peneira N° 200. Obteve-se um valor de IG igual a 3,7%, com isso, o solo é classificado com siltoso.

Os resultados da espectrometria de raios-X (FRX) do solo mostrou que os componentes químicos do solo e seus teores. Os mais observados são a sílica (60,17%), óxido de alumínio (17,56%) e óxido de ferro (5,30%).

Nos resultados do ensaio de DRX para o solo natural constatou-se a presença de 6 minerais entre eles: albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), quartzo (SiO_2), caulinita (Al_2O_3), periclásio (MgO), goethite (FeO(OH)) e argila, estando em de acordo com o ensaio de FRX. No pico de maior intensidade (26°) encontra-se o quartzo.

A albita é um feldspato alcalino, bem como um feldspato plagioclásio, que apresenta uma solução sólida que ocorre tanto em altas temperaturas como em baixas, onde ocorre à substituição acoplada de sódio e silício por cálcio e alumínio. A albita é usada em cerâmica, por ser um feldspato rico são empregados em interiores e exteriores de construção civil. Algumas ocorrências típicas da albita: granitos, pegmatitos graníticos, gnaisse metamórficos e xistos, e arenitos (LIRA; NEVES, 2013).

O quartzo (SiO_2) é o mineral mais abundante nesse solo, como visto no ensaio de FRX, por se tratar de um solo siltoso. De acordo com Gonçalves (2008) e Martins (2009) ele aparece de forma abundante nos solos com frações de areia e silte, entretanto também pode aparecer nas frações de argila, influenciando nas propriedades físicas.

A Caulinita formada por unidades de sílica e alumina, que conferem de uma estrutura rígida, portanto, praticamente estáveis na presença de água. Os minerais presentes neste grupo são classificados como pouco expansivos por não ocorrer hidratação nas camadas. Esses minerais presentes na caulinita possuem baixa capacidade de troca catiônica, entretanto maior capacidade de troca aniônica devido aos íons presentes fora das lâminas estruturais (BARBOSA, 2013; PEREIRA, 2004), isso comprova a baixa expansividade do solo. A porcentagem de periclásio no solo também influencia na expansão se na forma cristalina, mas na forma não cristalina, não provoca expansão no solo (SILVA, 2005), justificando a baixa expansão do solo. A goethita é um mineral de óxido de ferro, cuja fórmula química é FeO(OH) que pode ser visualizado em vários tons de marrom, variando do marrom amarelado até o marrom escuro, a quantidade variável, bem como presença de matéria orgânica ou não, é responsável por dar cor aos solos (HENRIQUES, 2012).

3.2 Cinza da lenha de algaroba (CLA)

Na amostra de CLA (sem nenhum beneficiamento) foram realizados os mesmos ensaios de caracterização dos solos. A curva granulométrica da CLA com o uso de defloculante no ensaio de sedimentação, apresentou 72,37% de finos, dividido em 61,27% de silte e 11,10% de argila. Nos ensaios de Atteberg, a CLA apresenta-se como material de comportamento não plástico. O peso específico dos grãos foi de 24,30 kN/m^3 . Através do ensaio de compactação obteve-se a peso específico aparente seco 13,10 kN/m^3 e umidade ótima de 30,31%.

Na composição da CLA, constata-se que o componente químico de maior predominância é o óxido de cálcio com 57,17%, seguido do potássio com 7,22%. De acordo com NBR 12653 (2012) um material só é considerado pozolânico se tiver um somatório mínimo de 50% dos percentuais de SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 , fato que não foi observado, possuindo apenas 0,56% de SiO_2 , 0,30% de Al_2O_3 , ou seja, valores muito abaixo do que a norma estabelece.

Através dos resultados do ensaio de DRX para a CLA, constata-se a presença de dois minerais bem definidos: a calcita (carbonato de cálcio – CaCO_3) e portlandita (hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2), estando de acordo com o ensaio de FRX, esses dois minerais também podem ser encontrados na cal hidratada do tipo CH-I usado no estudo de Pires (2016). No pico de maior intensidade (29°) encontra-se o carbonato de cálcio, mineral observado também por Leloup (2013), Nascimento (2014) e Cavalcanti (2016) em seus estudo com a CLA.

O carbonato de cálcio é um composto químico inerte, conseqüentemente ele é adicionado facilmente em produtos cimentícios, pois pode ser encontrado em todos os tipos de cimento Portland e também sendo resultado da carbonatação da cal hidratada auxiliando na redução de poros e aumento da durabilidade conseqüentemente (NASCIMENTO, 2014).

Os resultados obtidos indicam que a CLA pode ser misturada ao solo para estabilização a partir do contado grão a grão (CAVALCANTI, 2016).

3.3 Misturas do solo - CLA

As curvas granulométricas do solo natural e das misturas do solo com diferentes percentuais da CLA conservaram-se bem próximas, pelo fato de que, a CLA apresenta uma densidade muito leve, portanto, não influencia de forma significativa nas pesagens durante o ensaio, conseqüentemente a fração fina demonstram comportamentos semelhantes entre si.

Houve uma redução da umidade higroscópica nas misturas do solo com CLA, variando de 2.54% a 3.31%. O solo e a CLA estavam secos ao ar no instante do experimento, entretanto a cinza apresentava uma condição mais seca, quando comparado ao solo. Com o acréscimo de diferentes porcentagens de CLA ao solo, havendo uma redução nas umidades higroscópica das misturas, ressaltando que os ensaios de umidade não foram realizados no mesmo dia, com isso, pode-se ter influenciado nos valores.

Os ensaios de peso específico real dos grãos e densidade real dos grãos do solo natural ($26,76 \text{ kN/m}^3$) e das misturas com CLA ($26,35$; $26,24$; $26,04$ e $25,89 \text{ kN/m}^3$), respectivamente, apresentaram entre si uma variação média de 0.82%. A mistura do solo com 10% de CLA reduziu de 3,25% em sua densidade, quando comparada ao solo natural. Com a substituição de uma parcela de solo, que é um material mais denso, por uma porcentagem de CLA, material menos denso, ocorre uma mudança no volume da mistura quando comparado ao solo natural.

Na Figura 4 têm-se as curvas de compactação do solo natural e das misturas do solo + CLA, bem como a linha de tendência da umidade ótima. Com o aumento da porcentagem de CLA nas misturas houve um aumento no teor de umidade e uma diminuição na massa específica aparente seca, entretanto, o aumento da umidade é proporcionado devido ao aumento da absorção de água pelas cinzas (aumento de 21,43% na umidade ótima da mistura do solo + 10% CLA em comparação com o solo natural).

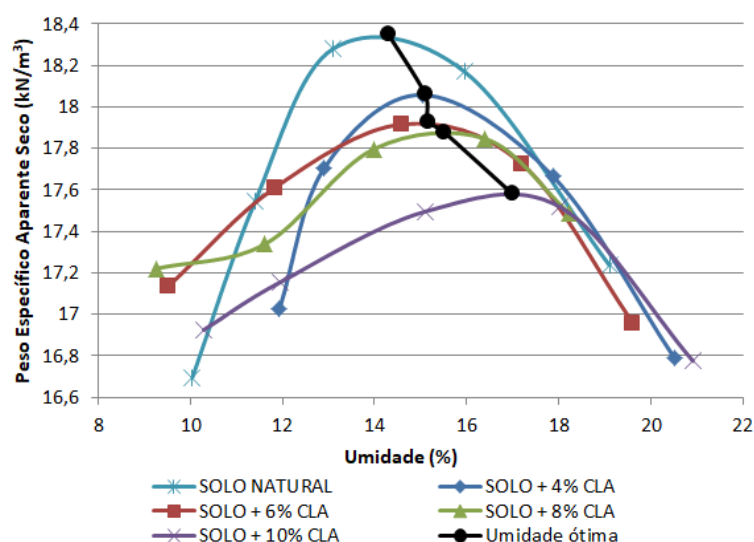


Figura 4 - Curvas de compactação. Fonte: Autores (2023)

Na Figura 5 é mostrada uma representação do comportamento dos dados obtidos através das curvas de compactação, ou seja, a diminuição da massa específica seca e aumento da umidade ótima. A adição de CLA ocasionou um aumento no LP e certa estabilidade nos LL, conseqüentemente havendo uma redução nos IP, constatando-se uma redução de 37,63% do solo com 10% de CLA para o solo natural (Figura 6).

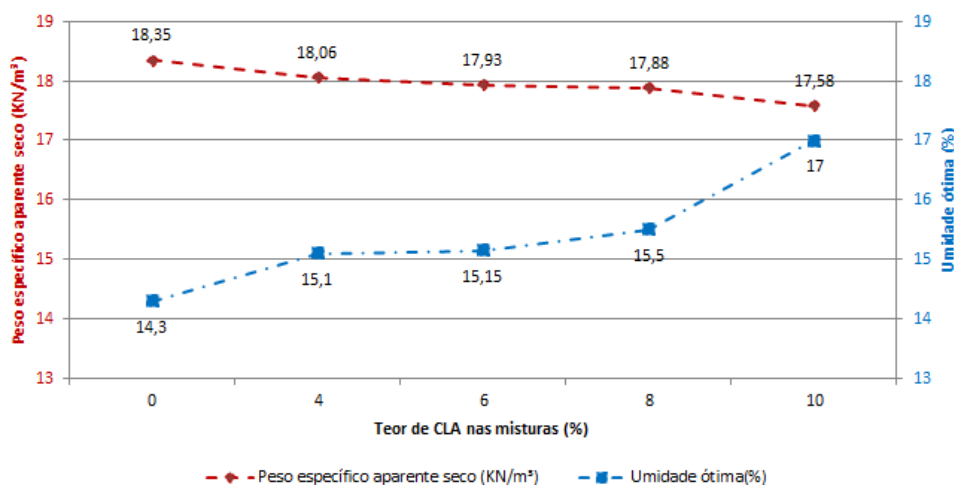


Figura 5 - Influência do teor de CLA no peso específico aparente seco e no teor das umidades ótimas nas misturas de solo + CLA. Fonte: Autores (2023)

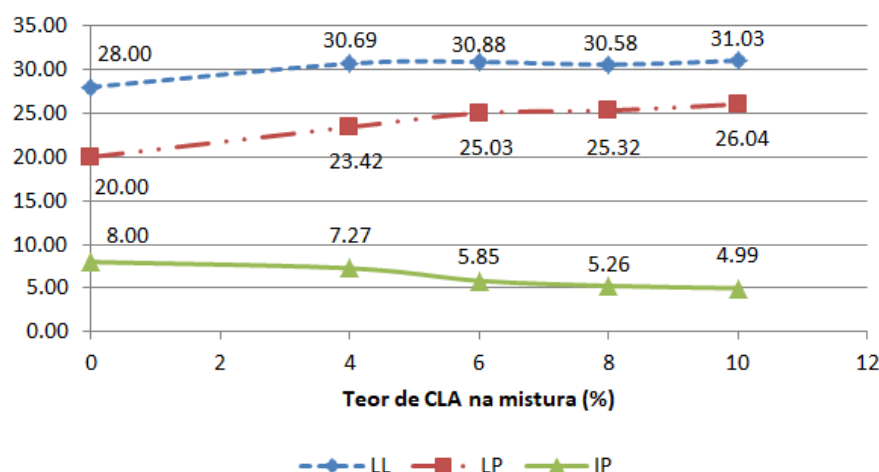


Figura 6 - Limites de Atterberg do solo e das misturas com CLA. Fonte: Autores (2023)

Vizcarra (2010) observou o incremento gradativo de cinzas de resíduos sólidos urbanos ao solo houve uma redução na densidade real dos grãos (em consequência da massa específica da cinza ser menor), e também, um aumento no LP e redução nos LL e IP, da mesma forma que houve com o acréscimo de CLA ao solo. Yadu, Tripathi e Singh (2011) observaram uma redução dos IP, densidade real dos grãos, aumento da umidade ótima e redução da massa específica máxima seca, com o acréscimo de cinza de casca de arroz e cinzas volantes ao solo. Resultados concordantes encontra-se com James, Pandian e Switzer (2017), Constantino (2018) e Silva, Bello e Ferreira (2020).

Drumond (2019) encontrou para a cinza de bagaço de cana-de-açúcar, os mesmos resultados, ou seja, aumento do LP, redução do LL e do IP, redução da densidade real dos grãos, isto em decorrência do aumento da cinza nas misturas com o solo. Contudo, constata-se que, com o aumento do teor de cinza, há necessidade de uma maior absorção de água pelo material, pois para que o material tornasse plástico necessitou de um maior teor de água, fazendo com os valores de LP se aproximasse do LL, tornando as misturas menos plásticas.

Os resultados obtidos nos ensaios FRX para o solo e as misturas de solo com a cinza de lenha de algaroba, verifica-se que com a adição da CLA ao solo, há redução de alguns óxidos

como no silício (16%), alumínio (14%) e ferro (11%), comparando o solo natural com a mistura do solo com 10% de CLA e, conseqüentemente acréscimos nos óxidos de magnésio e cálcio pertencentes à CLA. Na Figura 7 observa-se os resultados dos ensaio de DRX para o solo e as misturas solo + CLA. Constata-se que nas misturas aparecem os mesmos minerais do solo e mais a calcita (carbonato de cálcio) proveniente da CLA, onde a mesma não reage com o solo, portanto aumenta o percentual em decorrência do aumento do teor de CLA, como se pode verificar também no ensaio de FRX. Entretanto, não se observou de forma nítida os picos referentes à portlandita (hidróxido de cálcio), mas provavelmente têm-se picos em 18° e 34° . Outra causa se deve pela cristalinidade predominante do quartzo, que tem pico de maior intensidade aproximadamente em 26° , contatado também por Leloup (2013).

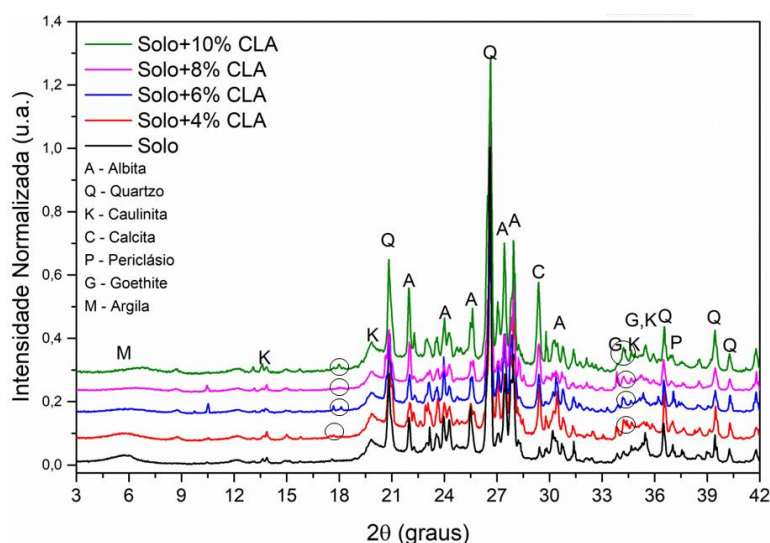


Figura 1 - Difração de Raios-X do solo e das misturas de solo + CLA. Fonte: Autores (2023)

3.4 Ensaio de resistência à compressão simples (RCS)

No período de cura de 28 dias, em decorrência do aumento do teor de CLA, ocorre o aumento da resistência à compressão simples, onde a mistura de solo com 10% CLA, apresenta o melhor resultado, com um aumento de 228% na resistência à compressão. Para os percentuais de 4%, 6% e 8% de CLA o aumento foi de 135%, 212% e 216%, respectivamente. Nas Figuras 8a e 8b, podem-se observar as linhas de tendência para a RCS em função do tempo de cura e em função do teor de CLA, respectivamente.

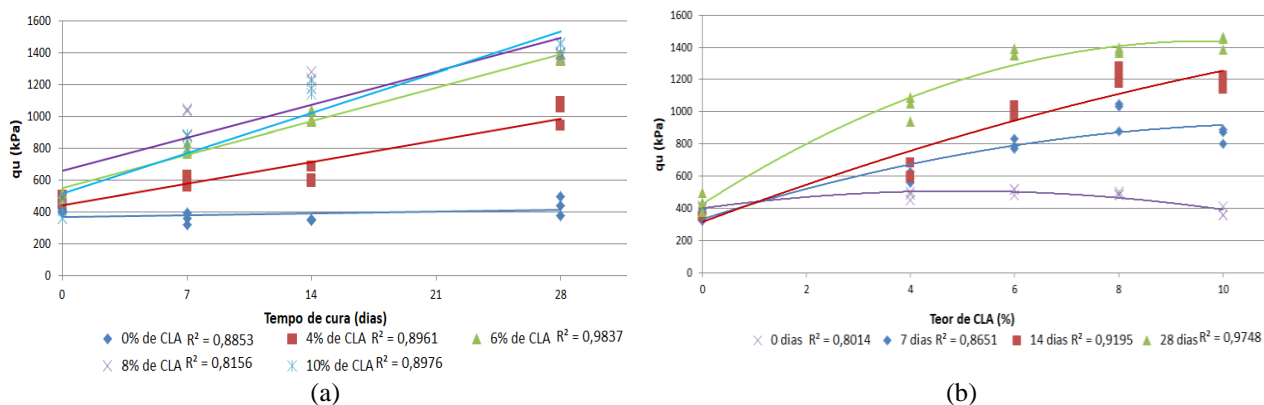


Figura 8 - (a) RCS x Tempo de Cura; (b) RCS x Teor de CLA. Fonte: Autores (2023).

Em decorrência do aumento do teor de CLA e do tempo de cura, há um aumento na resistência do solo, entretanto o solo com 10% de CLA obteve uma resistência menor nos tempos de cura de 0, 7 e 14 dias. A resistência do solo natural é praticamente constante com a variação do tempo de cura, e a resistência das misturas com 0 dias de cura, apresenta quase o mesmo comportamento, entretanto, houve uma redução da resistência do solo com 10% de CLA, devido ao aumento da umidade, conseqüentemente, diminuição da massa por volume, interferindo nos valores de RCS.

O comportamento do solo estabilizado com CLA é o mesmo apresentado por Baldovino (2018) com a cal, ou seja, houve um ganho de resistência à compressão simples (294, 358, 470, 518 e 660 kPa) em decorrência do aumento do teor de cal (0, 3, 5, 7 e 9%), com 15 dias de cura. Com 30 dias de cura atingiu os valores de 304 kPa, 404 kPa, 600 kPa, 632 kPa e 880 kPa, obtendo um aumento de 289% na cura de 28 dias quando comparado o solo natural com 9% de cal.

O acréscimo da CCA influencia na resistência à compressão axial simples das amostras, diminuindo estes valores em relação ao solo natural e mostrando que há um limite ótimo entre as misturas quando se trata de compressão axial simples, que foi de 308 kPa para o solo natural, com as porcentagens de 2% à 10% expõe valores de resistência próximos, mas para as porcentagens de 12% e 14% os valores decaem consideravelmente, obtendo respectivamente 103,5 kPa e 43,5 kPa, ressaltando que esse ensaio foi realizado no mesmo dia da moldagem, sem tempo de cura (SILVA, 2018; SILVA; BELLO; FERREIRA, 2020). Constantino (2018) que analisou um solo utilizando também a CCA, obteve com a mistura com 4% e 28 dias de cura, uma resistência de 398,79 kPa, o melhor desempenho para a RCS. Com o aumento do teor de CCA houve uma redução considerável na resistência do solo, mas não houve influência significativa em função do tempo de cura nos ensaios RCS. Guedes et al. (2022) utilizaram o cimento para a estabilização do solo, averiguando que em decorrência do aumento do teor de cimento, a resistência à compressão simples aumenta proporcionalmente, apresentando um comportamento linear, da mesma forma que podemos observar na mistura do solo com CLA.

Apesar das diversas aplicações o fator água/material cimentante, ainda não se encontra na literatura, metodologias de dosagem das respectivas misturas baseadas nos critérios racionais, como há para o concreto, onde o fator água/cimento desempenha um papel fundamental na obtenção da resistência desejada (VITALI, 2008). Mehta e Monteiro (2014) confirmam comentando que fator água/cimento influencia altamente na resistência mecânica do concreto.

No caso dos estudos de melhoramento de solo, pode-se averiguar a influência da relação da água/aditivo estabilizante na resistência final das misturas. Azambuja (2004) analisando as misturas de solo-cimento-bentonita, ele constatou que através dos ensaios de compressão simples e triaxiais não-drenados, que o fator água/cimento está diretamente ligada a resistência desse material. Foppa (2005), em seu estudo com solo artificialmente cimentado, não obteve uma relação bem definitiva entre a resistência à compressão simples e a relação água/cimento. Baldovino (2018) observou que a resistência à compressão aumentou em função da diminuição da relação água/cal e, com o aumento da energia de compactação.

Na Figura 9 é mostrada a influência da relação água/CLA na resistência à compressão simples (q_u) para os tempos de cura de 7, 14 e 28 dias.

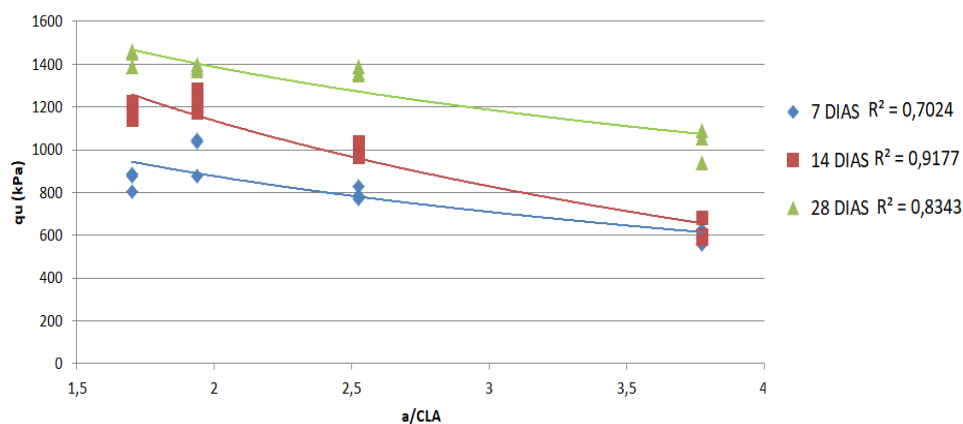


Figura 9 - Influência da relação água/CLA na resistência à compressão simples (q_u) para 7, 14 e 28 dias de cura. Fonte: Autores (2023)

A relação a/CLA variade 3,78 a 1,7, havendo uma redução de 55% da relação a/CLA, quando comparado o solo + 10% CLA com o solo + 4% CLA, e que normalmente com a diminuição da relação a/CLA há um aumento na resistência à compressão. Em relação a/CLA para o teor de 10% comparado com 4% de CLA, há acréscimo de resistência de 263,56 kPa, 554 kPa e 406 kPa para 7, 14 e 28 dias de cura.

3.5 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RTCD)

As linhas de tendência para a resistência à tração por compressão diametral (RTCD) em função do tempo de cura e teor de CLA são mostradas nas Figuras 10a e 10b, respectivamente. Observa-se que no período de cura de 28 dias, em decorrência do aumento do teor de CLA, ocorreu o aumento da resistência à tração por compressão diametral, onde a mistura de solo com 10% CLA, apresentou o melhor resultado para o tempo de cura de 28 dias, com um aumento de 314%. Para os percentuais de 4, 6 e 8 de CLA o aumento foi de aproximadamente 183%, 246% e 282%, respectivamente. A resistência do solo natural apresentou-se praticamente constantes com a variação do tempo de cura, e a resistência das misturas com 0 dias de cura, apresentou redução da resistência do solo com CLA. Essa redução ocorre devido ao aumento da umidade, consequentemente, diminuição da massa por volume, interferindo nos valores de RTCD. Esse comportamento foi observado nos ensaios de resistência à compressão simples.

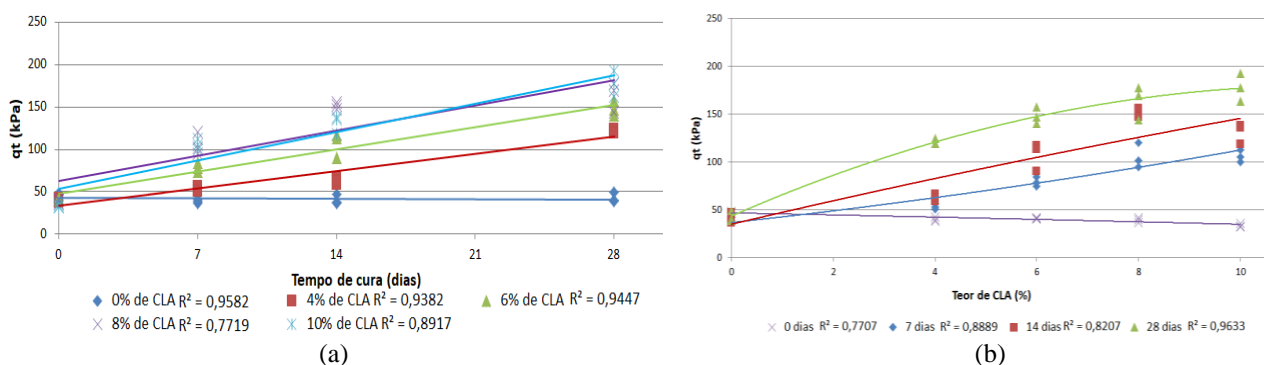


Figura 10 - (a) RTCD x Tempo de Cura; (b) RTCD x Teor de CLA. Fonte: Autores (2023)

Constantino (2018) verificou redução em relação à resistência à tração por compressão diametral com o acréscimo de cinza de casca de arroz ao solo, onde as amostras de solo +10% de CCA apresentou o menor resultado de 24,29 kPa, uma diferença de 37% em comparação ao solo natural. O tempo de cura também não apresentou uma interferência considerável. O comportamento que do solo com CLA é o mesmo apresentado por Baldovino (2018) com o uso de cal, ou seja, houve um ganho de resistência à tração no solo, em decorrência do aumento do teor de cal e o tempo de cura, com 15 dias, para os teores de 0, 3, 5, 7 e 9% de cal, obteve-se valores de 43kPa, 56 kPa, 74kPa, 101kPa e 127 kPa, respectivamente. Com 30 dias de cura a resistência a tração atingiu valores de 45 kPa, 66 kPa, 84 kPa, 109 kPa e 170 kPa, um ganho de 377% na resistência do solo com 9% de cal quando comparado ao solo natural aos 30 dias de cura.

A influência da relação água/CLA em massa, na resistência à tração por compressão diametral (q_t) para os tempos de cura de 7, 14 e 28 dias é mostrada na Figura 11.

A relação a/CLA, varia de 3,78 a 1,7, havendo uma redução de 55% da relação a/CLA, quando comparado o solo + 10% CLA com o solo + 4% CLA, e que normalmente com a diminuição da relação a/CLA há um aumento na resistência à tração por compressão diametral. Na resistência a/CLA para o teor de 10% comparado com 4% de CLA houve um acréscimo de 52,48 kPa, 68,26 kPa e 56,78 kPa para 7, 14 e 28 dias de cura.

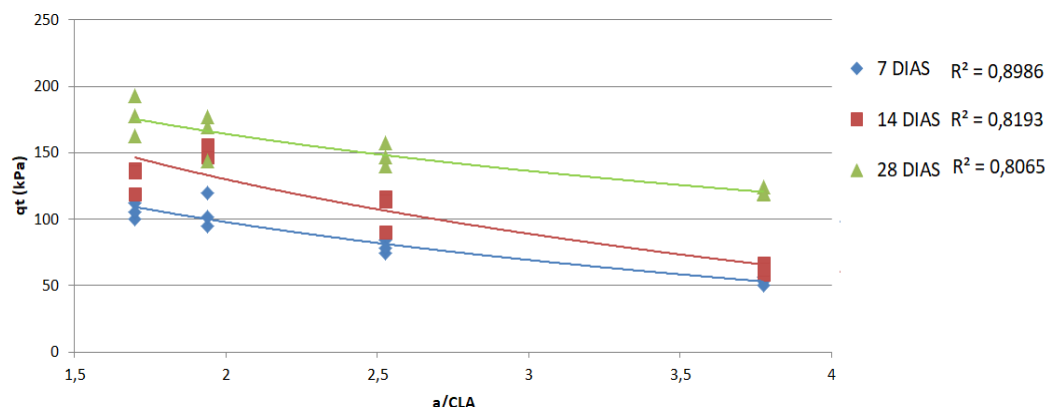


Figura 11 - Influência da relação água/CLA na resistência à compressão simples (q_t) para 7, 14 e 28 dias de cura. Fonte: Autores (2023)

3.6 Ensaios de cisalhamento direto

Na Figura 12 é exibida a curva de tensão cisalhante x deslocamento horizontal do solo puro que foram moldados com a energia normal de compactação e também a envoltória de Mohr-Coulomb. Que de acordo com Feuerharmel (2007), o gráfico apresenta uma curva do tipo “B”, ou seja, uma curva onde solo que possui uma resistência ao cisalhamento que cresce e depois permanece praticamente constante. O valor da coesão é de 18,85 kPa e ângulo de atrito de 27,92°.

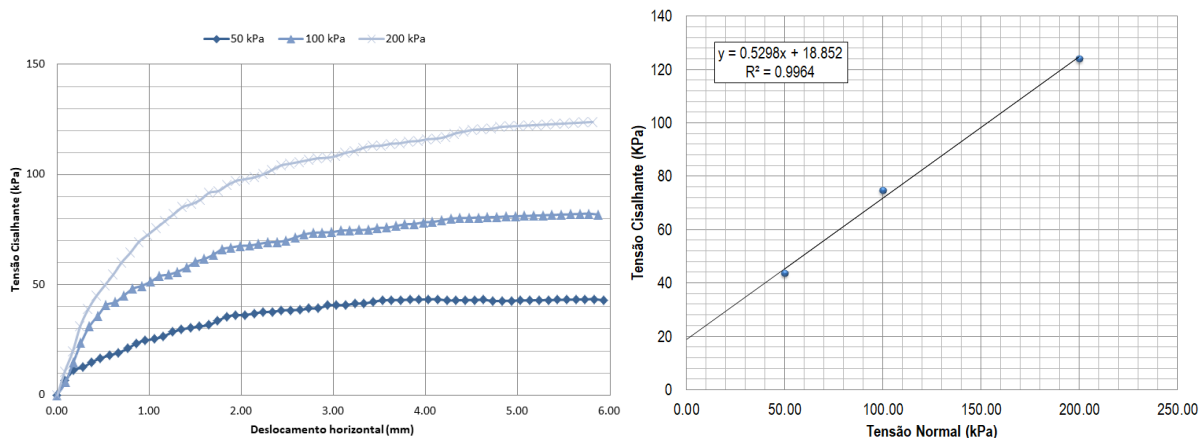


Figura 12 - Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal solo Puro e Envoltórias Mohr–Coulomb para solo natural. Fonte: Autores (2023).

A influência da CLA nas propriedades de cisalhamento direto para as misturas é analisada com 0 dias de cura, em comparação com o solo natural. Houve mudança de uma curva do tipo “B”, para uma curva tipo “A”, ou seja, nas curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal observa-se um aumento nos picos de resistência ao cisalhamento em decorrência do aumento do percentual de CLA, entretanto, no solo + 10% de CLA, há uma pequena redução da resistência quando comparado com a mistura de solo + 8% de CLA (Figura 13). Na tensão normal de 200 kPa, a tensão cisalhante em 4% de CLA foi de 154,98 kPa, e com 8% de CLA aumentou para 197,38 kPa, um aumento equivalente de 127,36%, da mesma forma observado nos ensaios de RCS e RTCD o solo + 8% CLA obteve os melhores resultados. Os resultados constataam um aumento da coesão em decorrência do aumento do teor de CLA de 26,35 kPa com 4% de CLA, para 43,59 kPa com 10% de CLA, ou seja, um aumento de 165,42%. O ângulo de atrito permaneceu praticamente constante, com uma variação de aproximadamente 6° .

Com 14 dias de cura há aumento nos picos de resistência ao cisalhamento em decorrência do aumento do percentual de CLA, exibindo curva do tipo “A” (Figura 14). Na tensão normal de 200 kPa, a tensão cisalhante em 4% de CLA foi de 147,65 kPa, e com 8% de CLA aumenta para 251,31 kPa, equivalente a 170,21%. Os valores do ângulo de atrito aumentam de $23,58^\circ$ com o teor de 4% de CLA, para $45,23^\circ$ com o teor de 8% de CLA. A coesão apresenta queda entre os teores de 4, 6 e 8%, entretanto, com 10% teve um aumento de 146,38% em relação a mistura com 4% de CLA e 202% em relação a mistura de 8% de CLA.

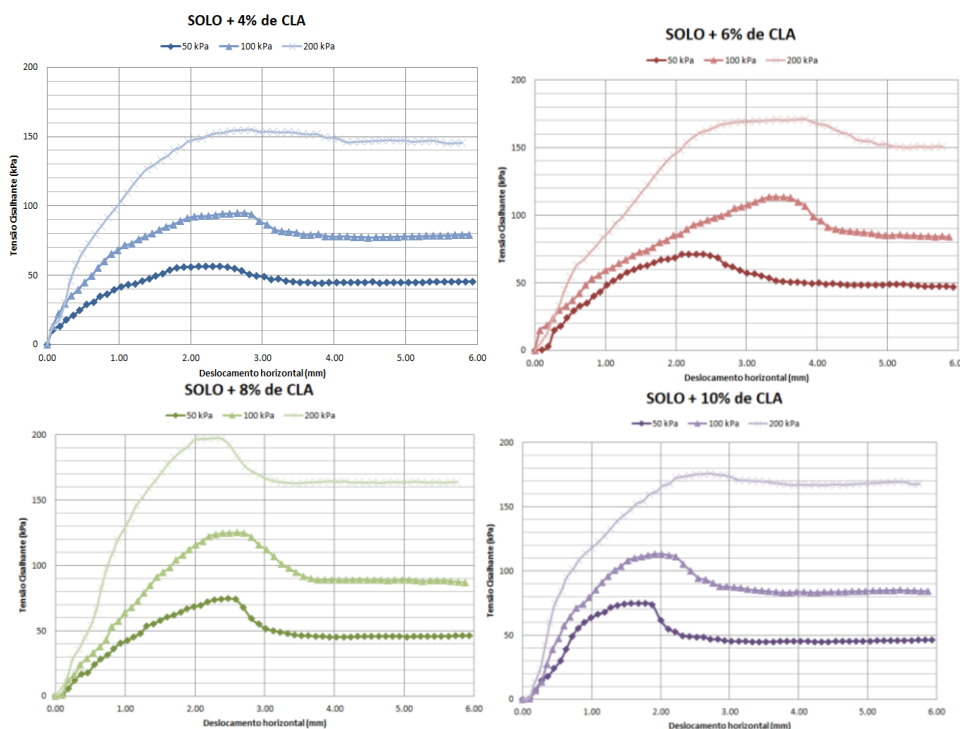


Figura 2 - Curvas de Tensão Cisalhante X Deslocamento horizontal (0 dias). Fonte: Autores (2023)

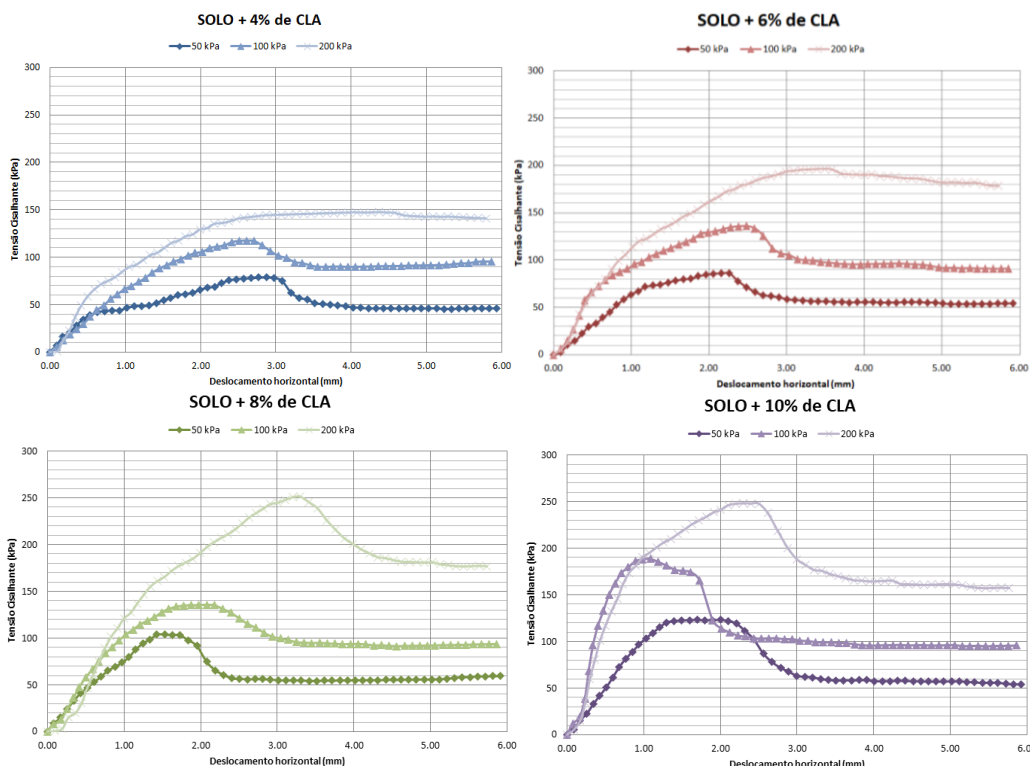


Figura 14 - Curvas de Tensão Cisalhante X Deslocamento horizontal (14 dias). Fonte: Autores (2023)

Com 28 dias de cura observa-se um aumento nos picos de resistência ao cisalhamento em decorrência do aumento do percentual de CLA (Figura 15), exibindo curva do tipo “A”. Houve um aumento dos valores de resistência, para a tensão normal de 200 kPa, a tensão cisalhante na porcentagem de 4% de CLA foi de 150,60 kPa, e com 10% de CLA aumentou para 288,05 kPa, um aumento equivalente de 191,27%.

Os resultados exibem um aumento no ângulo de atrito e na coesão em decorrência do aumento do teor de CLA. A coesão passa de 40,81 kPa, com o teor de 4%, para 74 kPa, com o teor de 8%, um aumento de 81,33%. O ângulo de atrito apresenta um valor de 28,85°, com 4% de CLA, e 48,96° para o teor de 10% de CLA, ou seja, um acréscimo de 160,7%.

No geral, a maior parte das misturas de solo + CLA, exibiu elevação na coesão em decorrência do aumento do teor de CLA, não havendo uma tendência de crescimento. Pode-se observar esse mesmo comportamento no estudo Meliande (2014) onde utilizou cinzas volantes, Benny et al. (2017) utilizando pó de vidro em um solo argiloso e Baldovino (2018) onde ele utilizou a cal para estabilizar um solo siltoso.

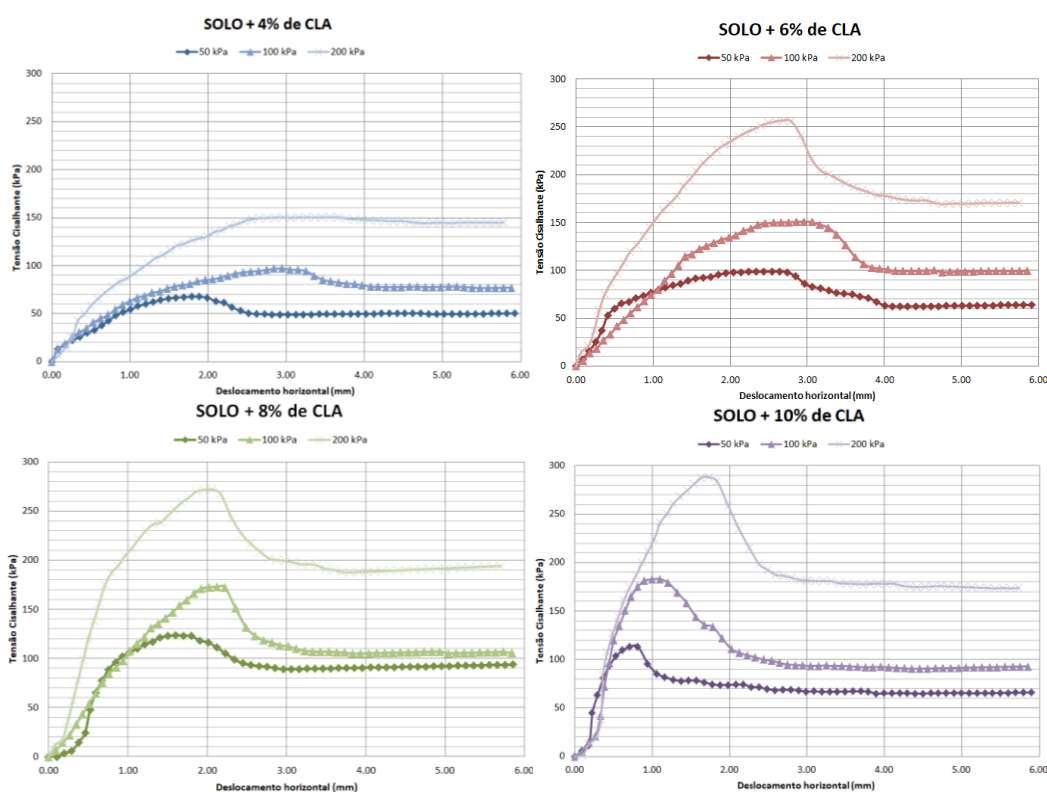


Figura 15 - Curvas de Tensão Cisalhante X Deslocamento horizontal (28 dias). Fonte: Autora (2023)

A influência do teor de CLA no ângulo de atrito e na coesão do solo, nos 3 tempos de cura (0, 14 e 28 dias) é mostrada nas Figuras 16a e 16b, respectivamente. Conforme resultados, o ângulo de atrito não apresenta uma linha de tendência definida, já coesão aumenta em decorrência do aumento do percentual de CLA na mistura com o solo, fazendo com que exista um melhoramento na coesão entre os grãos quando a CLA reage com a água nos vazios.

Os valores de coesão nas condições residuais não apresentam tendência definitiva, já o ângulo de atrito aumentou em função do aumento de CLA, podendo notar que os valores de ângulo de atrito permaneceram quase constantes nos diferentes tempos de cura, apresentando uma média de 35,71°, ou seja, apresentaram variações de 31,22° a 39,84°.

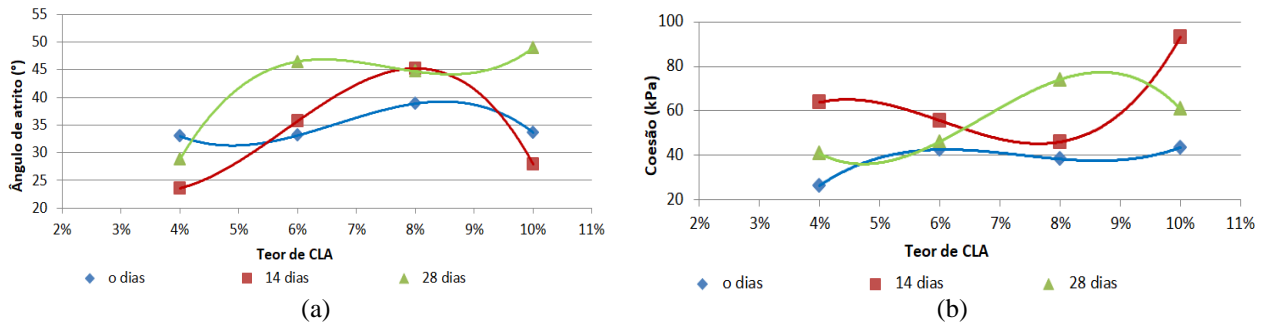


Figura 16 - Influência do teor de CLA: (a) no ângulo de atrito das misturas nos tempos de cura; (b) na coesão das misturas nos tempos de cura. Fonte: Autores (2023)

Nas Figuras 17a, 17b e 17c são exibidas as envoltórias para as condições residuais para os diferentes tempos de cura. Os valores das tensões cisalhantes apresentam-se quase constantes nas tensões normais de 50 kPa e 100kPa, já na tensão normal de 200kPa verifica-se um aumento da tensão cisalhante em função do aumento do teor de CLA. Esse mesmo comportamento foi observado no tempo de cura de 14 dias, entretanto, com a tensão normal de 200kPa, não se constata o mesmo aumento da tensão cisalhante.

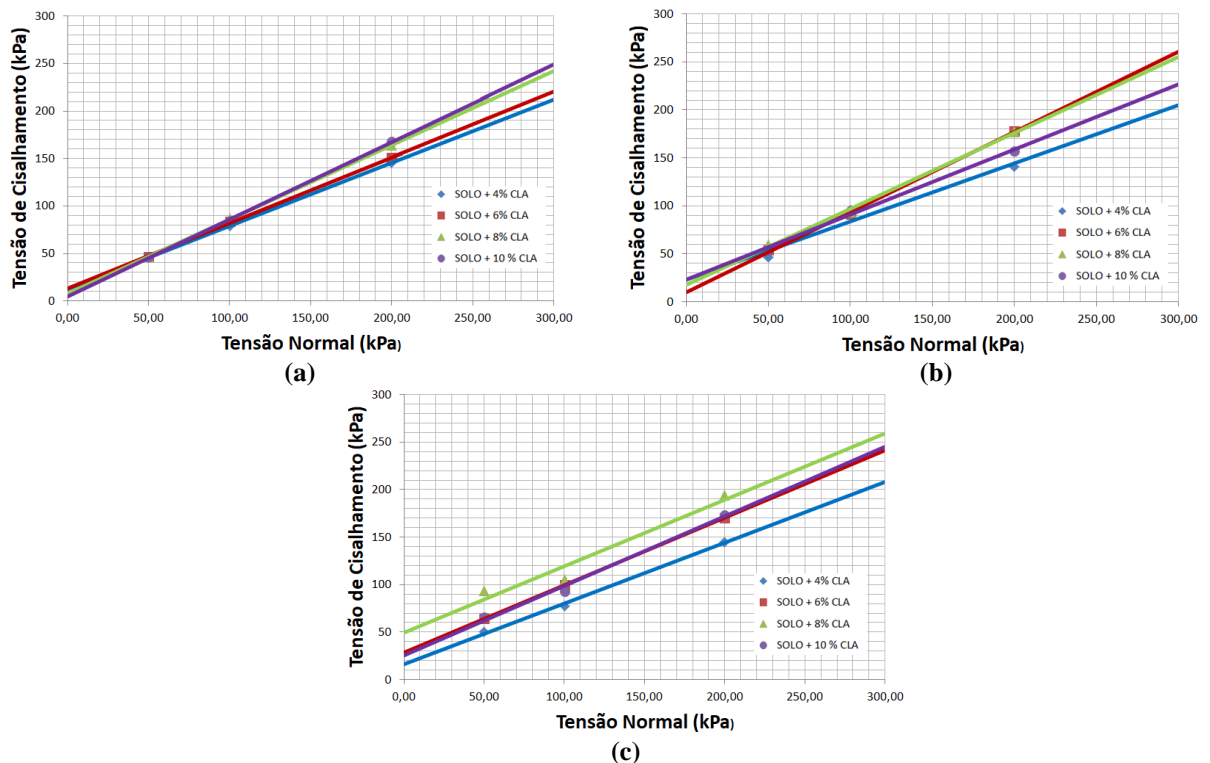


Figura 17 - Envoltória nas condições residuais com: (a) 0 dias de cura; (b) 14 dias de cura; (c) 28 dias de cura. Fonte: Autores (2023)

Em decorrência do aumento da CLA há elevação nos valores das tensões cisalhantes, mas o solo com 6% e 10% permaneceram praticamente iguais, entretanto o solo com 8% de CLA apresentou valores maiores.

De acordo com Baldovino (2018) muitas das construções são executadas sobre solos compactados, onde o processo de compactação proporciona um grau de saturação no solo de 75% a 90%. São exemplos de obras executadas sobre solos compactados, as obras de barragens, taludes, estradas e os aterros. Nos ensaios de cisalhamento direto os valores de resistência cisalhante e os parâmetros do solo (ângulo de atrito e intercepto coesivo), apresentaram ganhos consideráveis em relação ao solo natural compactado sendo que a mistura de solo com 10 % cinza de lenha de algaroba exibiu os maiores ganhos de resistência aos 28 dias de cura.

4. CONCLUSÕES

O solo é classificado como CL (argila de baixa plasticidade) ou ML (silte de baixa plasticidade) e A-4 solo siltoso. A CLA apresenta propriedades cimentantes, evidenciada através do ensaio de granulometria e os ensaios de resistência. Nas misturas do solo com CLA as granulometrias são similares.. A densidade real dos grãos há um decrescente com o aumento dos percentuais de CLA e a adição da CLA ao solo há um incremento na umidade ótima e diminuição da densidade seca máxima nas misturas, provocado pela maior absorção de água pela CLA.

A resistência à compressão simples (RCS), com 28 dias de cura, cresce de 135%, 212%, 216% e 228%, em função do aumento da porcentagem de CLA de 4, 6, 8 e 10, respectivamente. Com 10% de CLA, a resistência a compressão do solo alcançou um valor de 1435,49 kPa..

A resistência à tração por compressão diametral (RTCD) cresce com a adição do teros de CLA. Com 28 dias de cura, a resistência à tração do solo aumenta de 183%, 246%, 282% e 314%, para os percentuais de 4, 6, 8 e 10% de CLA, respectivamente. Para 10% de CLA resistência a tração alcança o valor de 177.81 kPa..

A relação água/CLA não se mostra um critério eficiente para estimar a resistência à compressão simples e a resistência à tração por compressão diametral.

Na maioria dos casos, a coesão aumenta em decorrência do tempo de cura e aumento dos teores de CLA, já o ângulo de atrito não apresenta uma tendência definitiva com a variação do tempo de cura e percentual de CLA, com variação entre 23° a 49°.

Conclui-se A CLA pode ser utilizada para melhoria do comportamento mecânico de solo e também pode-se reduzir um passivo ambiental gerado pelas inúmeras lavanderias da região do Agreste Pernambucano.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), processo nº IBPG-0989-3.01/21, pelo financiamento da bolsa de Mestrado do primeiro autor.

REFERÊNCIAS

AGEITEC. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. **Mapa de reconhecimento de baixa e média intensidade de solos do estado de Pernambuco**. Disponível em: < <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/337631/2/Mapa-de-reconhecimento-de-baixa-e-media-intensidade-de-solos-do-estado-de-Pernambuco.pdf> >. Acesso em 27 jun. 2024.

ALBUQUERQUE, F. C. et al. **Review of Expansive Soil Stabilization Methods**. VI International Symposium on Innovation and Technology (SIINTEC). *Anais*. São Paulo, 2020.

ALENCAR, V. L. DE L. **Caracterização geotécnica de solo estabilizado com cimento e cinzas de resíduos sólidos da saúde**. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil e Ambiental). Orientado por Prof(a). Dra. Maria Pilar Durante Ingunza, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D 2487**. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil). ASTM International, West Conshohocken, PA., v. null, p. 1, 2017.

_____**ASTM D 3080**. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. ASTM International, p. 1–9, 2011.

AMORIM, S. F. **Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informações geográficas dos solos expansivos e colapsíveis do estado de Pernambuco (SIGSEC-PE)**. Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnologia e Geociências. Engenharia Civil, UFPE, 2004, 263 p., 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Versão corrigida: 2016. Rio de Janeiro, 2016.

_____**ABNT. NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____**ABNT. NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm — Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016. 10p.

_____**ABNT. NBR 6459**: Solo — Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016. 5p.

_____**ABNT. NBR 7180**: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3p.

_____**ABNT. NBR 7181**: Solo — Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016. 12p.

_____**ABNT. NBR 7182**: Solo — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016. 9p.

_____**ABNT. NBR 12025**: Solo-cimento – ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____**ABNT. NBR 12653**: Materiais pozolânicos - requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

AZAMBUJA, R. M. B. **Comportamento mecânico e hidráulico de misturas de solo-cimento-bentonita para a aplicação em barreiras verticais de contenção de contaminantes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

AZEVÊDO, A. L. C. DE. **Estabilização de solos com adição de cal. Um Estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal**. Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

BALDOVINO, J. DE J. A. **Comportamento mecânico de um solo siltoso da formação geológica guabirotura tratado com cal em diferentes tempos de cura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2018.

BARBOSA, V. **Estudo do Comportamento Geotécnico de um Solo Argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. Orientador: Silvio Romero de Melo Ferreira, 2013.

BENNY, J. R.; JOSEPH J. K.; SEBASTIAN, J. M.; THOMAS, M. Effect of Glass Powder on Engineering Properties of Clayey Soil. **International Journal of Engineering Research and Technology**, v. 6, n. 05, p. 228–231, 2017.

CAVALCANTI, L. L. F. **Avaliação da resistência a compressão simples e absorção de água de tijolos vazadas de solo-cimento produzidos a partir da substituição parcial do cimento pela cinza de lenha de algaroba**. Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

CONSTANTINO, C. DE S. **Estabilização de um solo expansivo do município de Paulista com uso de cinzas de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

Dinesh, A., Indhumathi, S., Pichumani, M. Performance Assessment of Copper Slag and Sawdust Ash in Stabilization of Black Cotton Soil. **Advances in Sustainable Construction Materials**. Lecture Notes in Civil Engineering, v.124, p 213–227, 2021.

DRUMOND, M. A. M. M. **Avaliação da Aplicação da Cinza Resultante da Queima do Bagaço da Cana-de-Açúcar Sobre o Potencial Expansivo de uma Argila Proveniente do Município de Paulista-PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

FEUERHARMEL, C. **Estudo da resistência ao cisalhamento e da condutividade hidráulica de solos coluvionares não saturados da formação serra geral**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

FOPPA, D. **Análise de Variáveis-chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

GONÇALVES, D. **Caracterização mineralógica por Difração de Raios X e o Método de Rietveld da fração argila de um Latossolo Vermelho Distrófico em três manejos diferentes**. Dissertação (Mestrado em Química)- Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2008.

GUEDES, J. P. C.; TENÓRIO, E. A. G.; SILVANI, C.; BRAZ, R. I. F. Previsão da resistência à compressão simples de um solo expansivo estabilizado com cimento através do índice porosidade/teor volumétrico de cimento. **Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, v.59, n.2, p.110-115, 2022.

HENRIQUES, A. B. **Caracterização e estudo das propriedades eletrocínéticas dos minerais de ferro: hematita, goethita e magnetita**. Tese (doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

IBGE, **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/agrestina/panorama>>. Acesso em 20 jun. 2022.

JAMES, J.; PANDIAN, P. K.; SWITZER, A. S. EGG. Shell ash as auxiliary addendum to lime stabilization of an expansive soil. **Journal of Solid Waste Technology and Management**, v. 43, n. 1, p. 15–25, 2017.

LACERDA, L. S. S. DO N. DE. **Análise do comportamento geotécnico de solos de Cabrobó, potencialmente expansivos, estabilizados com cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

LEE, P. Y.; SUEDEKAMP, R. J. Characteristics of irregularly shaped compaction curves of soils. **Highway Research Record**, v. 381, p. 1–9, 1972.

LELOUP, W. D. A. **Efeito da adição de lodo têxtil e cinzas de lenha gerados no apl de confecções pernambucano em argamassa de cimento portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, 2013.

LIMA, R. P.; JACINTHO, A. E. P. G.A.; FORTI, N. C. S.; PIMENTEL, L.L. Estabilização de solo laterítico utilizando cinza do bagaço da cana de açúcar e cal hidratada. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 1, 2022.

LIMA, R. A. P. **Concretos auto-adensáveis com incorporação de cinza de madeira da algaroba com filer alternativo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pernambuco, 2019.

LIRA, H. L.; NEVES, G. A. Feldspatos: conceitos, estrutura cristalina, propriedades físicas, origem e ocorrências, aplicações, reservas e produção. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 3, p. 110–117, 2013.

MARTINS, T. **Caracterização mineralógica e da matéria orgânica do solo por técnicas espectroscópia e DRX**. Dissertação (Mestrado em química) - Universidade Estadual de Ponta Grossa., 2009.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, Instituto

Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2014.

MELIANDE, A. M. C. **Análise Do Comportamento De Misturas De Solos Com Cinza Volante De Carvão Mineral E Cal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2014.

MELO, M. C. S. DE. **Utilização de cinza de algaroba como matéria-prima alternativa para uso em blocos de solo-cal.** Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Campina Grande., 2018.

NASCIMENTO, J. E. F.; NÓBREGA, A. C. V.; FERREIRA, H. C.; NEVES, G. A.; SANTANA, L. N. L. Cinza de biomassa rica em calcário como material carbonático em sistemas cimentícios de base Portland. **Cerâmica**, v. 65, n. 373, p. 85–91, 2019.

NASCIMENTO, J. E. M. F. DO. **Avaliação dos efeitos da substituição da cal hidratada por cinzas de algaroba em argamassas de revestimento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, 2014.

PAIVA, S. C. de.; LIMA, M. A. de A.; FERREIRA, M da G. de V. X.; FERREIRA, S. R. de M. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. **Revista Matéria**, v. 21, n. 2, p. 437–449, 2016.

PEREIRA, E. M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada.** Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica) - Escola de Engenharia de São Carlos, 2004.

PIRES, D. R. **Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento portland por cinzas de algaroba geradas do apl (arranjo produtivo local) de confecções pernambucano.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru. 2016.

ROSALES, J.; AGRELA, F.; MARCOBAL, J. R.; DIAZ-LÓPEZ, J. L.; CUENCA-MOYANO, G. M.; CABALLERO, Á.; CABRERA, M. Use of Nanomaterials in the Stabilization of Expansive Soils into a Road Real-Scale Application. **Materials**, v. 13, n. 14, p. 1–25, 2020.

SANTOS, L. L. **Adição de cinza de lenha de Algaroba (Prosopis juliflora) em massa cerâmica para revestimento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal da Paraíba, 2014.

SANTOS, H. G. dos; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C. dos; Oliveira, V. A. de; Lumberras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A. de; Araujo Filho, J. C. de; Oliveira, J. B. de; Cunha, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos** – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SILVA, G. J. B. **Estudo do comportamento do concreto de cimento portland produzido com a adição de resíduo de polimento do porcelanato.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

SILVA, J. A. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo potencialmente expansivo, encontrado em Agrestina/PE, aplicando cinza de casca de arroz e cal como aditivos estabilizantes.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

SILVA, J. A.; BELLO, M. I. M. DA C. V.; FERREIRA, S. R. DE M. Comportamento geotécnico de um solo expansivo estabilizado com cinza de casca de arroz e cal hidratada. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n. 2, p. 232–256, 2020.

VITALI, O. P. M. **Efeito da composição de misturas de solo-cimento nos parâmetros de rigidez e de resistência.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia do Porto, 2008.

VIZCARRA, G. O. C. **Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2010.

Weatherspark. **Clima: Agrestina.** < <https://pt.weatherspark.com/y/31351/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Agrestina-Brasil-durante-o-ano> > Acessado em 21 mar. 2023.



YADU, L.; TRIPATHI, R. K.; SINGH, D. Comparison of fly ash and rice husk ash estabilized black cotton soil. **International Journal of Earth Sciences and Engineering**, v. 4, n. 6, p. 42–45, 2011.