



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**LUANA DANTAS DE MEDEIROS**

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

Caruaru  
2023

LUANA DANTAS DE MEDEIROS

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

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de mestra em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Orientadora: Prof. Dra. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello  
Coorientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira

Caruaru  
2023



LUANA DANTAS DE MEDEIROS

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

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de mestra em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Aprovada em: 26/04/2023.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dra. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello (Orientadora)  
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

---

Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira (Coorientador)  
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

---

Prof. Dra. Carina Silvani (Examinadora Externa)  
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

---

Prof. Dr. Jair de Jesús Arrieta Baldovino (Examinador Externo)  
Universidad de Cartagena (Colômbia)

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me dado forças para enfrentar as dificuldades, me dando todo o auxílio necessário, permitindo-me concluir esta etapa da vida, permitindo realizar mais um sonho.

À minha família, peça chave que representa equilíbrio e exemplo, serei sempre grata. Painho, você é exemplo de profissional, seus conselhos e suas palavras me incitam a buscar sempre mais! Mainha, seu afeto, preocupação e carinho são características que levo para minha vida pessoal, modelo de equilíbrio e sabedoria.

Agradeço ao apoio da minha querida irmã Lídia, meu namorado pela paciência e seu incentivo, não poderia deixar de mencionar minha amada família com todos os maravilhosos tios(as) e primos(as), que sempre me incentivaram a não desistir.

À minha orientadora Maria Isabela e meu coorientador Silvio Ferreira, por ter disposto de tempo e atenção para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço à Universidade Federal do Pernambuco e ao programa de pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM).

Ao técnico Henrique do laboratório de química do Centro acadêmico do Agreste (CAA) - UFPE, e a professora Érika Pinto, pelo auxílio nos ensaios de FRX e DRX.

Agradeço a todos que fazem parte Laboratório de Engenharia de Pavimentação (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), ao técnico Jadilson, o auxiliar José Ildo, os estudantes Manoel, Thamires, Matheus, Leonardo, Paulo Marinho, entre muitos outros, além dos professores Jonny, Ana Maria e Carina, por terem me recebido e auxiliado nos ensaios e ao Arthur por ter disponibilizado do seu tempo para ajudar nas análises dos ensaios de DRX.

Agradeço aos meus colegas de mestrado, Letícia, Márcia e Marco, por todo apoio, ajuda, colaboração e pela amizade.

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), pelo apoio financeiro.

“De tudo, ficaram três coisas: a certeza de que ele estava sempre começando, a certeza de que era preciso continuar e a certeza de que seria interrompido antes de terminar. Fazer da interrupção um caminho novo. Fazer da queda um passo de dança, do medo uma escada, do sono uma ponte, da procura um encontro” (SABINO, p.154, 1981).

## RESUMO

O solo, muitas vezes não apresenta as propriedades adequadas para suportar as cargas impostas, tendo-se a necessidade de realizar o seu melhoramento para satisfazer os requisitos de projeto. Esta pesquisa apresenta uma análise das características físico-químicas e o comportamento mecânico das misturas de um solo com diferentes percentuais de cinza de lenha de algaroba (CLA) e tempos de cura. O solo foi coletado da cidade de Agrestina, em Pernambuco. As misturas foram feitas com a adição de porcentagens de 4%, 6%, 8% e 10% de CLA em relação à massa da amostra seca para avaliar a evolução da estabilização em diferentes tempos de cura (0,7,14 e 28 dias). A metodologia abrangeu a execução de ensaios de caracterização geotécnica, comportamento mecânico do solo e das misturas de solo-CLA, e ensaios químicos. Nos ensaios mecânicos foi investigada a resistência à compressão simples (RCS), a tração por compressão diametral (RTCD) e os parâmetros de cisalhamento direto (ângulo de atrito e coesão). Nos ensaios químicos de espectrometria de Fluorescência de Raios-x (FRX) e Difração de Raios-x (DRX) verificou-se os componentes químicos presentes e os seus minerais. Observou que houve mudanças nas propriedades físicas do solo em decorrência da adição de CLA, assim como também verificou um aumento na resistência em decorrência do aumento do teor de CLA e tempo de cura, em função da cimentação que ocorre nas misturas de solo-CLA. No ensaio de RCS, o aumento foi de 228% do solo com 10% de CLA e 28 dias de cura, já no ensaio de RTCD o aumento foi de 314%, e no ensaio de resistência ao cisalhamento observou que a coesão aumentou em decorrência do tempo de cura e aumento dos teores de CLA, já o ângulo de atrito não apresentou uma tendência definitiva.

**Palavras-chaves:** Estabilização; cinza da lenha de algaroba; Resistência à compressão simples; resistência à tração por compressão diametral; resistência ao cisalhamento direto.

## ABSTRACT

The soil often does not present the appropriate properties to support the imposed loads, having the need to perform its improvement to meet the project requirements. This research presents an analysis of the physical-chemical characteristics and the mechanical behavior of mixtures of a soil with different percentages of algaroba wood ash (AWA) and curing times. The soil was collected from the city of Agrestina, Pernambuco. The mixtures were made with the addition of percentages of 4%, 6%, 8% and 10% of AWA in relation to the mass of the dry sample to evaluate the evolution of stabilization at different curing times (0, 7, 14 and 28 days). The methodology included geotechnical characterization tests, mechanical behavior of the soil and the soil-AWA mixtures, and chemical tests. The mechanical tests investigated the unconfined compressive strength (UCS), split tensile strength and the direct shear parameters (friction angle and cohesion). In the chemical tests of X-ray Fluorescence (XFR) and X-ray Diffraction (XRD) it was verified the chemical components present and their minerals. He observed that there were changes in the physical properties of the soil as a result of the addition of AWA, as well as verified an increase in strength as a result of increasing AWA content and curing time, due to the cementation that occurs in soil-AWA mixtures. In the UCS test, the increase was 228% of the soil with 10% of AWA and 28 days of curing, while in the split tensile strength test the increase was 314%, and in the shear strength test it was observed that cohesion increased as a result of curing time and increased levels of AWA, while the friction angle did not show a definite trend.

**Keywords:** Stabilization; algaroba wood ash, unconfined compressive strength, split tensile strength, shear direct strength.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Linhas de rachadura em edificações de pequeno porte, de maneira esquemática	20
Figura 2:	Métodos de estabilização do solo	20
Figura 3:	Evolução dos estudos publicados sobre estabilização de solos, por décadas	32
Figura 4:	Estudos publicados sobre estabilização de solos por tipo de aditivo	33
Figura 5:	Estudos publicados sobre estabilização química de solos, percentual por continente: (a) de estudos publicados; (b) do uso da cal por continente; (c) de uso de cinzas por continente.	34
Figura 6:	Árvore (a) e lenha (b) de algaroba	38
Figura 7:	Descarte irregular de cinzas de algaroba	39
Figura 8:	(a) Localização do estado de Pernambuco no mapa do Brasil e (b) da Cidade de Agrestina no Pernambuco	41
Figura 9:	Localização do município de Agrestina no mapa de susceptibilidade à expansão dos solos	42
Figura 10:	Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Município de Agrestina, PE	43
Figura 11:	Dados pluviométricos e de temperatura do município de Agrestina	44
Figura 12:	Fluxograma das etapas experimentais	45
Figura 13:	Perfil do solo de Agrestina e as transições das camadas	46
Figura 14:	Coleta e transporte do Solo em Agrestina/PE	46
Figura 15:	CLA antes (a) e após peneiramento (b)	47
Figura 16:	Ensaio de sedimentação	48
Figura 17:	Equipamento utilizado (FRX) (a) e ensaio de perda ao fogo - Mulfa(b)	49
Figura 18:	Prensa para compactação estática e molde dos corpos de prova	51
Figura 19:	Corpos de prova	52

Figura 20:	Cilindro e Aparamento dos Corpos de prova para o ensaio de cisalhamento	52
Figura 21:	Corpos de prova para o ensaio de cisalhamento	53
Figura 22:	Etapas do ensaio de compressão simples: a) posicionamento do corpo de prova, b) rompimento do corpo de prova	53
Figura 23:	Etapas do ensaio de tração por compressão diametral: a) posicionamento do corpo de prova e b) rompimento do corpo de prova	54
Figura 24:	Equipamento e montagem da célula de cisalhamento direto	55
Figura 25:	Curva granulométrica solo natural	56
Figura 26:	Curva de Compactação - solo natural	57
Figura 27:	Carta de plasticidade (SUCS)	57
Figura 28:	Difração de Raios-X do solo natural	60
Figura 29:	Curva granulométrica da CLA	61
Figura 30:	Curva compactação - CLA	61
Figura 31:	Difração de Raios-X da CLA	63
Figura 32:	Curva granulométrica do solo natural e das misturas de solo+ CLA	64
Figura 33:	Teores de umidade higroscópica	65
Figura 34:	Densidade real dos grãos	65
Figura 35:	Curvas de compactação	66
Figura 36:	Gráfico da massa específica aparente seca e suas respectivas umidades ótimas do solo e das mistura de solo+CLA	67
Figura 37:	Limites de Atteberg do solo e das misturas com CLA	67
Figura 38:	Difração de Raios-X do solo e das misturas de solo+CLA	69
Figura 39:	RCS x Tempo de Cura	71
Figura 40:	RCS x Teor de CLA	71
Figura 41:	Influência da relação água/CLA na resistência à compressão simples ( $q_u$ ) para 7, 14 e 28 dias de cura	73
Figura 42:	RTCD x Tempo de Cura	75
Figura 43:	RTCD x Teor de CLA	75
Figura 44:	Influência da relação água/CLA na resistência à	

	compressão simples (qt) para 7, 14 e 28 dias de cura	76
Figura 45:	Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal solo Puro e Envoltórias Mohr–Coulomb para solo natural	77
Figura 46:	Curvas de Tensão Cisalhante X Deslocamento horizontal (0 dias)	78
Figura 47:	Envoltórias de Mohr-Coulomb das misturas de solo+ CLA com 0 dias de cura	79
Figura 48:	Curvas de Tensão Cisalhante X Deslocamento horizontal (14 dias)	80
Figura 49:	Envoltórias de Mohr-Coulomb das misturas de solo+ CLA com 14 dias de cura	81
Figura 50:	Curvas de Tensão Cisalhante X Deslocamento horizontal (28 dias)	81
Figura 51:	Envoltórias de Mohr-Coulomb das misturas de solo+ CLA com 28 dias de cura	83
Figura 52:	Influência do teor de CLA no ângulo de atrito das misturas nos tempos de cura	83
Figura 53:	Influência do teor de CLA na coesão das misturas nos tempos de cura	84
Figura 54:	Envoltória nas condições residuais com 0 dias de cura	85
Figura 55:	Envoltória nas condições residuais com 14 dias de cura	85
Figura 56:	Envoltória nas condições residuais com 28 dias de cura	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Evolução da estabilização química em solos	24
Tabela 2:	Dados pluviométricos e térmicos de Agrestina, relativos a cada mês	44
Tabela 3:	Ensaio realizados, quantidade de amostras e as normas	48
Tabela 4:	Características do solo natural	57
Tabela 5:	Classificação dos solos (Transportation Research Board)	58
Tabela 6:	Critério de classificação quanto à expansão do solo em estudo (métodos indiretos qualitativos)	59
Tabela 7:	Dados do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X do solo	59
Tabela 8:	Dados do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X da CLA	62
Tabela 9:	Caracterização física do solo e das misturas solo-CLA	64
Tabela 10:	Peso específico real dos grãos das misturas com CLA	65
Tabela 11:	Massa específica aparente seca e umidade ótima do solo e das misturas com CLA	67
Tabela 12:	Dados do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X do solo e as misturas de solo-CLA	69
Tabela 13:	Resultados do ensaio de resistência à compressão simples (RCS)	70
Tabela 14:	Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RTCD)	74
Tabela 15:	Resultado do ensaio de cisalhamento para o solo natural	77
Tabela 16:	Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as misturas com 0 dias de cura	79
Tabela 17:	Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as misturas com 14 dias de cura	80
Tabela 18:	Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as misturas com 28 dias de cura	82
Tabela 19:	Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as misturas em diferentes tempos de cura e teores de CLA (parâmetros residuais)	84

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APL	Arranjos Produtivos Locais
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BDTD	Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações
CAA	Centro Acadêmico do Agreste
CB	Cinza de Base
CLA	Cinza da Lenha de Algaroba
CPs	Corpos de Prova
CT	Cinza de Topo
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difração de Raios X
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FRX	Fluorescência de Raios X
HRB	<i>Highway Research Board</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
NBR	Norma Brasileira
PE	Estado do Pernambuco, Brasil
PPGECAM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
UFPE	Universidade Federal do Pernambuco

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\gamma_d$	Peso específico seco aparente
$\gamma_s$	Peso específico real dos grãos
a/CLA	Relação água / cinza de lenha de algaroba
AT	Área transversal
d	Diâmetro do corpo de prova
Fr	Força de ruptura
h	Altura do corpo de prova
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
RCS ou qu	Resistência à compressão simples
RTCD ou qt	Resistência à tração por compressão diametral
$V_{cp}$	Volume do corpo de prova
w	Umidade

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>17</b>
<b>1.1.1</b>	<b><i>Geral</i></b>	<b>17</b>
<b>1.1.2</b>	<b><i>Específicos</i></b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b>	<b>17</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura da dissertação</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Estabilização de solos</b>	<b>19</b>
<b>2.1.1</b>	<b><i>Estabilização Mecânica</i></b>	<b>21</b>
<b>2.1.2</b>	<b><i>Estabilização Física</i></b>	<b>21</b>
<b>2.1.3</b>	<b><i>Estabilização Química</i></b>	<b>22</b>
2.1.3.1	<i>Evolução da estabilização química em solos</i>	24
2.1.3.2	<i>Estabilização química em solos no Brasil</i>	34
<b>2.2</b>	<b>Cinzas de lenha de algaroba</b>	<b>37</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>Área de estudo</b>	<b>41</b>
<b>3.2</b>	<b>Programa experimental</b>	<b>44</b>
<b>3.2.1</b>	<b><i>Coleta de amostras</i></b>	<b>45</b>
<b>3.2.2</b>	<b><i>Descrição dos ensaios</i></b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>56</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização do solo</b>	<b>56</b>
<b>4.2</b>	<b>Cinza da lenha de algaroba (CLA)</b>	<b>61</b>
<b>4.3</b>	<b>Misturas do solo - CLA</b>	<b>63</b>
<b>4.3.1</b>	<b><i>Granulometria das misturas</i></b>	<b>63</b>
<b>4.3.2</b>	<b><i>Umidade das misturas</i></b>	<b>64</b>
<b>4.3.3</b>	<b><i>Densidade real dos grãos</i></b>	<b>65</b>
<b>4.3.4</b>	<b><i>Compactação</i></b>	<b>66</b>
<b>4.3.5</b>	<b><i>Limites de Atteberg</i></b>	<b>67</b>
<b>4.3.6</b>	<b><i>Espectrometria de fluorescência de raios-x (FRX) para solo e misturas</i></b>	<b>68</b>
<b>4.3.7</b>	<b><i>Difração de raios-x (DRX) para solo e misturas</i></b>	<b>69</b>

<b>4.4</b>	<b>Ensaio de resistência à compressão simples (RCS)</b>	<b>70</b>
<b>4.4.1</b>	<b><i>Influência do teor da CLA e o tempo de cura na RCS</i></b>	<b>70</b>
<b>4.4.2</b>	<b><i>Influência da relação água/CLA na RCS</i></b>	<b>72</b>
<b>4.5</b>	<b>Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RTCD)</b>	<b>74</b>
<b>4.5.1</b>	<b><i>Influência do teor da CLA e o tempo de cura na RTCD</i></b>	<b>74</b>
<b>4.5.2</b>	<b><i>Influência da relação água/CLA à na RTCD</i></b>	<b>76</b>
<b>4.6</b>	<b>Ensaio de cisalhamento direto</b>	<b>77</b>
<b>4.6.1</b>	<b><i>Parâmetros do solo natural</i></b>	<b>77</b>
<b>4.6.2</b>	<b><i>Influência da CLA nas propriedades de cisalhamento direto para as misturas</i></b>	<b>78</b>
4.6.2.1	<i>Com 0 dias de cura</i>	78
4.6.2.2	<i>Com 14 dias de cura</i>	80
4.6.2.3	<i>Com 28 dias de cura</i>	81
<b>4.6.3</b>	<b><i>Influência da CLA nos parâmetros residuais de cisalhamento</i></b>	<b>84</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>87</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>89</b>

## 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 que são 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. 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 nenhuma delas trata do uso da CLA para o melhoramento das propriedades físicas e mecânicas do solo.

Esta pesquisa 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. Foram realizados ensaios caracterização da CLA, do solo e das misturas de solo-CLA, de resistência à compressão simples (RCS), de tração por compressão diametral (RTCD) e de

cisalhamento direto. A campanha experimental foi realizada no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) – UFCG, campus de Campina Grande, Paraíba.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Geral**

Melhorar o comportamento de um solo com a adição de cinza de lenha de algaroba (CLA).

### **1.1.2 Específicos**

- a) Analisar a influência do teor de CLA (4%, 6%, 8% e 10%), na resistência a compressão simples (RCS) e na tração por compressão diametral (RTCD) e a influência do teor de água/CLA, nos tempos de cura (0, 7, 14 e 28 dias).
- b) Avaliar a influencia do teor de CLA (4%, 6%, 8% e 10%) nos tempos de cura (0, 14 e 28 dias) na coesão e no ângulo de atrito interno das misturas, através do ensaio de cisalhamento direto e nas condições residuais.
- c) Comparar os resultados obtidos através de estudos recentes encontrados na literatura.

## **1.2 Justificativa**

Muitas vezes o solo não apresenta as propriedades adequadas para suportar as cargas impostas, e por esse motivo, tem-se a necessidade de realizar o seu melhoramento, de forma que ele venha a resistir aos esforços a ele solicitados (BRITO; PARANHOS, 2017). Devido a essas circunstâncias, novas técnicas de melhoramento de solos são desenvolvidas ao longo dos tempos, e com a preocupação nos impactos ambientais e com o desenvolvimento sustentável. Deve-se considerar o tipo de aditivo, a disponibilidade e a quantidade necessária para a estabilização. Esses fatores incidirão diretamente na viabilidade e nos custos da obra.

Essa pesquisa dá continuidade aos estudos sobre o melhoramento de solos, e as mudanças das propriedades físicas, químicas e mecânicas. Trata-se de uma pesquisa pioneira visto que é a primeira a utilizar a CLA como aditivo para melhoramento de solo. A lenha de Algaroba é utilizada como fonte de energia térmica para geração de vapor, o qual é gerado através da queima da lenha em uma fornalha que gera calor para uma caldeira, gera uma grande quantidade de cinzas.

Estas cinzas se descartadas de forma inadequada, ocasionam sérios problemas ambientais (CAVALCANTI FILHO, 2016).

### **1.3 Estrutura da dissertação**

No Capítulo 1 são apresentados a introdução, expondo a relevância da pesquisa, os objetos gerais e específicos, a justificativa e a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 é apresentado o estudo bibliográfico, com todas as informações necessárias para o desenvolvimento desta pesquisa, contemplando os assuntos: (a) estabilização dos solos; e (b) características da cinza de lenha de algaroba.

O Capítulo 3 é composto pelos materiais (caracterização da área de estudo, do solo e da CLA) e os métodos utilizados para a análise das características do solo, da CLA e suas misturas.

No Capítulo 4 encontram-se os resultados desta pesquisa, os quais compreendem as caracterizações físicas, químicas e mecânicas do solo, CLA e das misturas do solo com CLA, onde na caracterização mecânica foi verificado as resistências à compressão simples (RCS), a tração por compressão diametral (RTCD) e também ao cisalhamento, de forma a analisar o comportamento do solo como o incremento de cinza de lenha de algaroba.

No Capítulo 5 estão as conclusões e sugestões para próximas pesquisas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura sobre o tema abordado, com todas as informações necessárias ao desenvolvimento desta pesquisa, contemplando os assuntos: (a) estabilização dos solos; e (b) características da cinza de lenha de algaroba.

### 2.1 Estabilização de solos

O material que se pode encontrar em grande quantidade e várias formas de aplicabilidade no mundo é o solo (GONDIM, 2008), entretanto nem sempre ele apresenta as condições necessárias para desempenhar de maneira adequada as solicitações previstas, com isso, utiliza-se a técnica de estabilização dos solos (CRUZ; JALALI, 2010), ou seja, um procedimento que procura aumentar a sua estabilidade sobre as cargas externas e as ações climáticas (MORAIS, 2018). Esse tratamento pode ser feito através de tratamento físico, químico ou mecânico, sendo normalmente estabilizados com um aglutinante (JAMES; PANDIAN, 2018). Contudo, a eficácia submete-se a condição do solo em termos de propriedades físicas e químicas (SINGH; SHARMA; ABHISHEK, 2017), das propriedades do estabilizador e do tipo de construção (AL-RAWAS *et al.*, 2002).

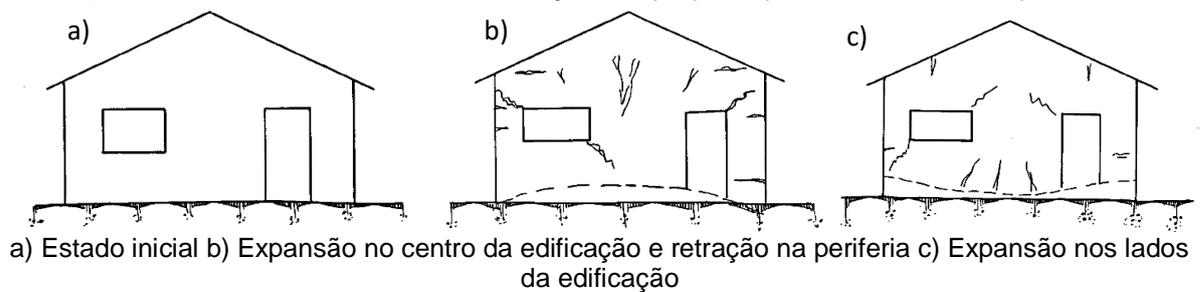
De acordo com Bordignon (2015) os mecanismos de estabilização do solo são considerados como temporário, onde corresponde a uma estabilização de curto prazo, geralmente é utilizada durante uma fase da obra. Já a estabilização permanente sem adição, que está associado aos processos de compactação e de tratamento térmico e a estabilização com adição de aditivos, onde unem a compactação e a adição de um aditivo estabilizador como a cal e o cimento.

Segundo Cristelo (2001), as principais propriedades de um solo que o engenheiro se preocupa são, expansividade, resistência, a durabilidade dessa resistência e permeabilidade. A estabilização do solo não deve ser só pensada em termos de correção das propriedades naturais, como também nas medidas preventivas que podem ser desenvolvidas durante a construção ou na vida útil da obra. Sem a utilização das técnicas de melhoramento nas obras de Engenharia Civil

onde o solo não apresenta as propriedades adequadas, pode ocasionar vários problemas, tal como, fissuras, trincas e ondulações (CONSTANTINO, 2018).

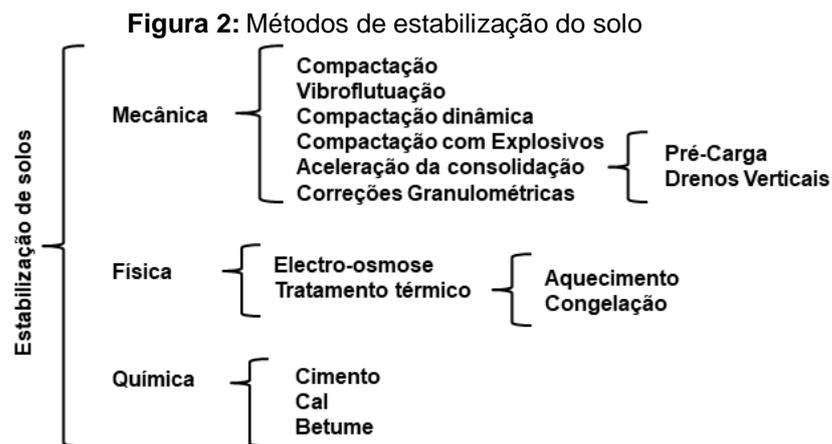
Na Figura 1 é mostrado esquematicamente, o provável processo de fissuração em uma edificação de pequeno porte, quando ocorre expansão do solo no centro da edificação e também nas laterais, onde é possível observar fissuras diagonais nas proximidades das janelas e portas.

**Figura 1:** Linhas de rachadura em edificações de pequeno porte, de maneira esquemática.



**Fonte:** Carcedo *et al.* (1986)

Cristelo (2001) menciona que os métodos de estabilização de solos são classificados frequentemente em três grupos: estabilização mecânica, onde procura melhorar as características do solo através de um arranjo das partículas constituintes e/ou recorrendo a soluções de sua composição granulométrica; estabilização física, onde altera as propriedades do solo através do calor, e da eletricidade, etc.; e, estabilização química, que alteram as propriedades do solo por meio de aditivos químicos. Na Figura 2 são apresentados alguns dos métodos utilizados para estabilização do solo expansivo.



**Fonte:** Cruz e Jalali (2010)

A escolha do método de estabilização de um solo é determinada seguindo alguns fatores, os quais são destacados: os fatores econômicos, o objetivo do trabalho, as características dos materiais e as propriedades do solo que deve ser corrigido (ALBUQUERQUE *et al.*, 2020).

### **2.1.1 Estabilização Mecânica**

Os métodos mecânicos de estabilização do solo são aqueles em que não se acrescentam nenhum material ao solo, ou seja, consiste numa compactação, que é um processo que complementa qualquer outro procedimento de estabilização. Conseqüentemente, aumentam a densidade do solo, melhorando sua resistência mecânica e durabilidade. Além de reduzir o volume de vazios, reduzindo os poros e inibindo a percolação da água e a erosão provocada por ela (PAIVA, 2016), ou seja, esse processo altera apenas o arranjo das partículas do solo ou a sua granulometria (GONDIM 2008).

Segundo Santos *et al.* (1995 *apud* VIZCARRA, 2010), a compactação do solo relaciona-se com o processo de tratamento, com o intuito de reduzir a porosidade através da aplicação de cargas, presumindo que a redução do volume de vazios está relacionada com o ganho de resistência mecânica. Já a correção granulométrica envolve as melhorias de um solo através da mistura do mesmo tipo de solo ou outros que proporcionem em um novo material com as propriedades apropriadas para fins de engenharia.

### **2.1.2 Estabilização Física**

De acordo com Pinto (2008), neste tipo de estabilização são modificadas as propriedades do solo, de forma que altera sua textura. Várias técnicas são utilizadas, dentre elas podemos destacar, os tratamentos térmicos de secagem ou congelamento, o tratamento elétrico e eletro-osmose, que melhoram as características estruturais e de drenagem dos solos (OLIVEIRA, 1994).

Os tratamentos térmicos por congelamento, um procedimento com caráter provisório, o processo implica na remoção do calor do maciço de solo, causando uma diminuição na temperatura abaixo do ponto de congelamento da umidade dos poros intersticiais, portanto o solo tem que possuir elevada percentagem de água (não saturado), pois o método resulta do congelamento artificial do terreno,

transformando água em gelo, conseqüentemente aumentando as características mecânicas do solo, tornando-o impermeável (ALMEIDA, 2003). Ou seja, a umidade age como agente cimentante, unindo as partículas do solo entre si, possibilitando uma formação de uma rede estrutural de apoio ao maciço de solo. Portanto, o calor é transferido para atmosfera por arrefecimento, passando por tubos dispostos entre a superfície e a zona a congelar (SALVADO, 2012).

De acordo com Silva (2015) a eletro-osmose é uma manifestação de fluxo hidráulico ocasionado por um campo elétrico. Portanto, ao se aplicar uma corrente elétrica em um solo saturado ou parcialmente saturado, é criado um sistema de forças elétricas opostas, onde os ânions movimentam-se no sentido do ânodo (polo positivo) e os cátions para o cátodo (polo negativo). Com movimento dos íons água também em carregada em direção ao cátodo. O solo possui uma movimentação restrita, entretanto a água fica livre para movimentar-se, ou seja, os íons levam as águas de hidratação fazendo um arreste viscoso na água ao redor, logo, esse fluxo de água é denominado eletro-osmose, normalmente utilizado para remediação e descontaminação de solos.

### **2.1.3 Estabilização Química**

A estabilização química é realizada através da adição de um ou mais aditivos ao solo, de forma a estabilizar e melhorar suas características (AZEVEDO, 2010). Essa estabilização baseia-se em mudar o ambiente físico-químico das partículas do solo dentro e ao seu redor, fazendo com que haja mudança no comportamento da água que se move dentro e fora dos vazios, promovendo assim, mudança no comportamento do solo como um todo (ALBUQUERQUE *et al.*, 2020), ou seja, ocorrem reações químicas, troca catiônica, os aditivos mais utilizados para realizar essa estabilização são a cal e o cimento (BURGOS *et al.*, 2020).

- Solo-cal

A mistura de solo-cal para estabilização de solos é uma das técnicas mais antigas, altamente propagadas pelo Brasil e mundo, dispondo de vários estudos que expõem resultados satisfatórios quanto à durabilidade e eficiência (AFRAIN, 2017; LOPES JUNIOR, 2007).

Sandroni e Consoli (2010) comentam que para se realizar o tratamento do solo com a cal, a quantidade da cal varia em decorrência das características do solo, o uso e as quais as características mecânicas almejada na mistura.

Há mistura da cal com o solo, resulta a ocorrência de várias reações químicas, algumas de forma imediata e outras da maneira mais lenta, resultando na estabilização do solo com o ganho da resistência (SILVA, 2016), entre elas temos: troca catiônica, floculação, e reações pozolânicas (CRISTELO, 2001; VIZCARRA, 2010).

A princípio, a cal age no solo através de reações de intercâmbio iônico e floculação/aglomeração, com isso, a cal tem potencial para alterar a granulometria e ainda reduzir a plasticidade do solo, resultando na melhoria da trabalhabilidade e proporcionando uma compactação mais fácil. Em seguida ocorrem as reações pozolânicas, que depende do tempo e condições ambientais, onde promove a cimentação das partículas de solo desse modo há um aumento da resistência (MEDEIROS; SILVA; FURLAN, 2019).

- Solo-cimento

A estabilização do solo através do acréscimo de cimento na mistura corresponde à ligação das partículas de solo ocasionada pela hidratação das partículas do cimento que formam cristais que tem potencial de associarem-se uns aos outros resultando em um aumento na resistência a compressão (AFRAIN, 2017).

Para Yoder e Witczak (1975) a estabilização do solo com cimento, corresponde ao acréscimo de cimento Portland a um solo, deixando que a mistura enrijeça pela hidratação do cimento. Algumas condições podem afetar as propriedades físicas do solo-cimento, como: tipo do solo, quantidade de cimento, grau de mistura, tempo de cura e a densidade seca da mistura compactada.

Conforme Sandroni e Consoli (2010 *apud* VIZCARRA, 2010) há diversos tipos de cimentos que são capazes de estabilizar vários tipos de solos, entretanto apresentam dificuldades representativas em argilas altamente plásticas e orgânicas por possuir um alto teor de plasticidade, portando para obtenção de melhorias significativas nas propriedades mecânicas há quase sempre uma necessidade de utilizar uma porcentagem de cimento mais elevada, ou seja, para que o solo venha a apresentar uma redução do limite de liquidez e aumento no índice de plasticidade e

trabalhabilidade, como se pode verificar em de solos argilosos. Segundo Vizacrra (2010), usualmente quanto maior a quantidade de finos no solo maior será a quantidade de cimento necessário para estabiliza-lo.

À proporção que o cimento infiltra nas camadas de solo, ocorre o preenchimento dos vazios entre as partículas de solo, conseqüentemente há a redução do índice de vazios. Em seguida, quando a água é acrescentada ao solo, o cimento reage com a água e endurece, aumentando assim a sua resistência ao cisalhamento e a capacidade de carga (AFRAIN, 2017).

### 2.1.3.1 Evolução da estabilização química em solos

Em meados nos anos 1950, começaram a expor os sucessos na estabilização química dos solos. Medeiros, Ferreira e Bello (2023) apresentam os principais trabalhos reportados na literatura técnica sobre a estabilização de solos e os correspondentes aditivos químicos utilizados dos anos 50 até os dias atuais (Tabela 1).

**Tabela 1:** Evolução da estabilização química em solos.

AUTOR	ADITIVO	LOCAL	RESULTADOS DAS PESQUISAS
Barshad (1950)	-	-	Efeitos de cátions intercalados, bem como a natureza da substância, sobre a expansão dos solos.
Chu <i>et al.</i> (1955)	cinzas volantes e cal	Texas, Virginia, Iowa e Kentucky	As misturas contendo 25% de cal e cinzas apresentaram resistências mais altas do que as misturas com 15%.
Jones (1958)	cal hidratada e cimento	Vale Central da Califórnia	O cimento reduziu o encolhimento do solo depois de seco, contudo a cal foi superior com relação à deterioração pela ação de umedecimento e secagem.
Carroll (1959)	cal	-	As reações são devidas a composição química do mineral e dos elementos químicos (troca iônica em argilas).
Hilt e Davidson (1960)	cal	Iowa, Texas, Michigan, Illinois, Carolina do Norte e Virginia	Em solos caulíníticos e montmoriloníticos obtiveram ganho de resistência apenas com a cal, mas o clorítico e elítico necessitaram da adição do cimento juntamente com a cal para obter ganho de força.
Davidson <i>et al.</i> (1960)	fosfato de sódio, carbonato de sódio ou hidróxido de sódio	Iowa	O carbonato de sódio e o fosfato de sódio não são tão promissores quanto o hidróxido de sódio para melhorar a estabilização da cal de solos argilosos.
Anday (1961)	Cal	Virginia	Indicação de uma previsão de ganho de força com base na cura laboratorial.

**Tabela 1:** Evolução da estabilização química em solos (continuação).

<b>AUTOR</b>	<b>ADITIVO</b>	<b>LOCAL</b>	<b>RESULTADOS DAS PESQUISAS</b>
Mitchell e Hooper (1961)	Cal	Califórnia	Um tratamento com 4% de cal foi considerado como um aditivo estabilizador para a argila expansiva. Entretanto, há melhoria na resistência não foi elevada; no entanto, a eficácia da cal na redução do inchaço.
Ruff e Davidson (1961)	cal e silicato de sódio	Iowa	Das combinações de cal e silicato analisadas, a mistura ideal para resistência máxima foi de 6% de cal mais 4% de silicato.
Eades; Nichols Jr; Grim, (1963)	Cal	Virginia	Com base nos resultados dos três projetos de campo, pode-se concluir que com cal hidratada há um aumento da resistência, devido à formação de novos minerais.
Anday (1963)	Cal	Virginia	Desenvolvimento da reação pozolânica, investigando o ganho das forças dos solos curados em campo e no laboratório.
Mateos (1964)	Cinzas volantes	-	Analisou vários tipos de cinzas volantes. Constatou que algumas cinzas volantes possuem qualidades cimentícias sem adição de cal.
Diamond e Kinter (1965)	Cal	Texas	Profunda compreensão do mecanismo de como as moléculas hidróxido de cálcio interatuam na superfície dos minerais de argila para modificar a superfície e estabilizar a argila. Necessidade da ocorrência da reação pozolânica para obtenção do ganho de força e redução da plasticidade.
Walker e Karabulut (1965)	Cal	Virginia	Analisaram o efeito do congelamento e descongelamento de solos estabilizados com adição de cal. Os resultados mostraram que a resistência aumentou bastante com a cal, entretanto, sofreu diminuição na força de compressão quando exposto ao congelamento e descongelamento.
Laguros (1965)	Cal hidratada e aditivos químicos (hidróxido de sódio, cloreto de cálcio e ortossilicato de sódio)	Texas	A estabilização do solo com cal oferece melhorias consideráveis com o uso de aditivos químicos, mas este tipo de adição não melhora as propriedades de consistência das misturas.
Townsend e Klym (1966)	Cal	Canadá	Durabilidade de solos estabilizados com cal
Lundy e Greenfield (1968)	Cal	Pensilvânia	Primeiros a estudar a estabilização do solo por injeção de pasta de cal de alta pressão

**Tabela 1:** Evolução da estabilização química em solos (continuação).

<b>AUTOR</b>	<b>ADITIVO</b>	<b>LOCAL</b>	<b>RESULTADOS DAS PESQUISAS</b>
Carroll e Starkey (1971)	Ácido clorídrico, ácido acético, hidróxido de sódio, solução de cloreto de sódio e água do mar natural.	Wyoming, Kentucky, Illinois, Utah, Virginia, Guam.	Descobertas sobre a reatividade de minerais de argila com ácidos e alcalinos, o que desencadeou o uso de outros agentes químicos além da cal para melhorar as propriedades físicas do solo expansivo.
Ozier e Moore (1977)	Cal	Oklahoma, Alabama	Fatores que interferem na resistência à compressão não confinada de uma argila tratada com cal, de forma a determinar se pequenas quantidades de cloreto de sódio podem acelerar o processo de estabilização.
Brandl (1981)	Cal, cimento, hidróxido de sódio, cloreto de cálcio e cloreto de sódio.	Estados Unidos	Fatores de influência das características são extremamente dependentes do tempo de reação, teor de água e o tipo de cura das amostras.
Jeyapalan; Jr.; Lytton (1981)	-	-	Revisão sobre métodos de tratamentos de solos expansivos, dos quais o tratamento químico é o mais utilizado.
Kennedy <i>et al.</i> (1987)	Cal e Cimento	Texas	Os solos expansivos de alta plasticidade tratados com cal obtiveram uma maior resistência à compressão do que os tratados com cimento.
Bell (1989)	Cal	-	Os teores de cal normalmente são baseados no efeito de várias adições de cal, ou seja, uma variação de misturas de cal-solo pode ser utilizada de forma a alcançar diferentes objetivos.
McCallister e Petry (1990)	Cal	Texas	Indicaram que para fornecer durabilidade, a porcentagem de cal adicionada necessita ser suficiente para gerar reações pozolânicas de longo prazo e também grandes formações de silicato de cálcio.
Basma e Tuncer (1991)	Cal	Jordânia	O efeito da cal na mudança de volume e compressibilidade das argilas expansivas (mudanças nas propriedades físicas pela adição de cal diminuindo a expansividade do solo).
McCallister e Petry (1991)	Cal	Texas	Verificaram as mudanças nas propriedades físicas causadas por lixiviação.
Nicholson et al. (1994)	Cal e cinzas volantes	Havaí	Obtendo melhorias na resistência, diminuição da plasticidade e redução do inchaço.
Bell (1996)	Cal	-	As propriedades de cal no solo variam e dependem do tipo de solo argiloso, a duração da cura e o método. Quando a cal é adicionada ao solo, os íons de cálcio são combinados ou absorvidos pelos minerais da argila e essas mudanças continuam até o ponto de fixação.

**Tabela 1:** Evolução da estabilização química em solos (continuação).

<b>AUTOR</b>	<b>ADITIVO</b>	<b>LOCAL</b>	<b>RESULTADOS DAS PESQUISAS</b>
Attom e Al-Sharif (1997)	Resíduos de Azeitona queimada	Jordânia	Diminuição da plasticidade, aumentou a densidade seca e o aumento resistência à compressão.
Miller e Azad (2000)	Pó de forno de cimento	Oklahoma	Redução do índice de plasticidade de solo.
Çokça (2001)	Cinzas Volantes de classe C	-	Obteve resultados favoráveis para se realizar a estabilização do solo, onde foram comparados com a estabilização utilizando cal e cimento.
Nalbantoğlu (2004)	Cinzas Volantes	Chipre	Com o uso de cinzas volantes de forma a reduzir o seu potencial de expansão e constatou que o tratamento com as cinzas é eficaz.
Ribeiro e Conciani (2005)	Cal hidratada	Cuiabá	Estudo do comportamento expansivo do solo saprolítico de filito, concluindo que a estabilização com cal é utilizada para ganho de resistência e também para problemas químicos.
Punthutaecha <i>et al.</i> (2006)	Cinzas volantes classe F, fibras de polipropileno e fibras de náilon	Texas	O solo estabilizado com cinzas mostrou melhorias na redução das características de inchaço, encolhimento e plasticidade em 20 a 80%, enquanto o tratamento com fibras resultou em melhorias variadas.
Okagbue (2007)	Cinza de madeira	Nigéria	O ganho de resistência teve vida curta devido a sua resistência diminuir após 7-14 dias de cura.
Brooks (2009)	Cinza de casca de arroz e cinzas volantes	Filadélfia	Resultado favorável para utilização dessa estabilização para subleito.
Santos (2009)	Emulsão asfáltica	Sergipe	No solo argiloso observou-se diminuição no processo expansivo do solo devido à ação impermeabilizante da emulsão asfáltica, evitando que a saturação do solo influenciasse na sua deformação.
Oliveira (2010)	Cal	Ribeirão das Neves/MG	Vantagens como aditivo estabilizador do solo, comprovando redução da expansão a níveis aceitáveis e redução de espessura final do pavimento.
Kawahashi <i>et al.</i> (2010)	Ligantes com alto teor de escória	São Paulo	Resultados positivos para o controle da expansão, entretanto sem alteração significativa quanto ao módulo de resiliência das misturas.
Vizcarra (2010)	Cinzas de resíduos sólido urbano (RSU)	Campo Grande/RJ	Diminuição da expansividade do solo. Comportamento mecânico compatível a um pavimento de baixo volume de tráfego.
Seco <i>et al.</i> (2010)	Cal, gesso, óxido de magnésio, cinzas de casca do arroz, cinzas de carvão, cinzas de aço, enchimento de aluminato	Tudela (Espanha)	Obtiveram que a cinza de casca de arroz apresentou maior eficácia nas capacidades mecânicas do solo.

**Tabela 1:** Evolução da estabilização química em solos (continuação).

<b>AUTOR</b>	<b>ADITIVO</b>	<b>LOCAL</b>	<b>RESULTADOS DAS PESQUISAS</b>
Yadu, Tripathi e Singh (2011)	Cinza de casca de arroz e cinzas volantes	Chhattisgarh (Índia)	Redução no índice de plasticidade e densidade do solo.
Consoli et al. (2011)	Solo cimentado reforçado com fibras	Porto Alegre/ RG	A colocação de fibra causou um aumento na resistência à compressão do solo cimentado.
Al-Mukhtar <i>et al.</i> (2012)	Cal	-	As melhorias das propriedades geotécnicas que surgem nas reações cal-argila, principalmente uma reação pozolânica, por meio de uma análise microscópica.
Dash e Hussain (2012)	Cal	-	O tratamento com cal deve ser evitado a solos ricos em sílica, devido o gel de sílica reter uma grande quantidade de água, fazendo com que haja o aumento da plasticidade e do inchaço.
Obuzor <i>et al.</i> (2012)	Escória de alto-forno granulada moída ativado com cal	-	Sua utilização podem ser duráveis nas camadas estruturais de estradas/ aterros.
Barbosa (2013)	Cal	Cabrobó /PE	Resultados positivos do comportamento geotécnico do solo argiloso potencialmente expansivo, estabilizado com cal.
Celik e Nalbantoglu (2013)	Escória e cal	Chipre	Continuaram o estudo de Obuzor <i>et al.</i> (2012), onde sondaram os seus efeitos nas propriedades de expansão de solos contendo sulfato estabilizado com cal, os resultados dos testes apresentaram que o uso da cal com a escória produziu melhorias na plasticidade, bem como no potencial de expansão.
Saride <i>et al.</i> (2013)	Cal e cimento	Texas	Estudo para compreender os mecanismos comportamentais de solos expansivos tratados com esses aditivos.
Mohammed <i>et al.</i> (2013)	Cinza de casca de arroz	Iraque	Redução no limite de liquidez e também no índice de plasticidade.
Khemissa e Mahamedi (2014)	Cal e cimento	Argélia	Melhores desempenhos com o tratamento misto com 8% de cimento e 4% de cal.
Sabat e Pradhan (2014)	Cinzas volantes reforçadas com fibra de polipropileno.	-	A porcentagem ideal de fibra de polipropileno para reforço de solo expansivo estabilizado com porcentagem ideal de cinza volante (20%) é de 1% e o comprimento ideal de 12 mm. Pode-se obter uma economia 7% e 13,6% no custo de construção por metro quadrado de área de pavimento.
Malekzadeh e Bilsel (2014)	Cinza de Posidonia oceanica (PO)	Chipre do Norte	O uso de 10% de PO, que é uma alga marinha mais abundante do Mar Mediterrâneo, apresentou uma redução de intumescimento e aumento de resistência à compressão.

**Tabela 1:** Evolução da estabilização química em solos (continuação).

<b>AUTOR</b>	<b>ADITIVO</b>	<b>LOCAL</b>	<b>RESULTADOS DAS PESQUISAS</b>
Maia et al. (2014)	Resíduo de Fabrica de celulose - Grits	Fortaleza/CE	Diante dos resultados, obteve-se um ganho de resistência do solo, principalmente com a mistura de 20% de Grits, com isso, o solo obteve valores satisfatórios para utiliza-lo em sub-base.
Modarres e Nosoudy (2015)	residuais de carvão e cal	Irã	Os resultados obtidos através das análises de difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura indicaram mudanças substanciais na estrutura do solo após a adição dos aditivos.
Paiva et al. (2016)	Cal	Paulista/PE	O valor de 5% de cal hidratada adicionado ao solo expansivo de Paulista reduziu a expansão livre e tensão de expansão a valores praticamente nulos.
Goodarzi et al. (2016)	Cimento e sílica ativa	Irã	Com base nas análises de raio X e microscopia eletrônica de varredura, a incorporação de sílica ativa na matriz cimentícia prolonga a formação de novos compostos cimentantes e proporciona uma microestrutura muito mais densa.
Michael, Singh e Kesharwani (2016)	Cinza da manga	Índia	Os resultados mostraram potencial para melhorar as propriedades do solo.
Liu et al. (2017)	Acetato de polivinila	China	Efeito nas propriedades de dilatação e contração do solo expansivo.
James, Pandian e Switzer (2017)	Cinza de casca de ovo e cal	Índia	Apresentou um aumento na resistência inicial.
Mousavi (2017)	Cinza de turfa	Malásia	Êxito no acréscimo da cinza de turfa pode substituir o cimento como aditivo de estabilização.
Tenório (2018)	Resíduo de mármore e cal	Paulista/PE	O resíduo é capaz de conter a expansão do solo, entretanto ele se comporta com um ativo inerte, sem provocar reações químicas. Quando comparado à cal com o resíduo, observou que a cal é mais eficaz na contenção da expansão.
James e Pandian (2018)	Bagaço de cana-de-açúcar e cal	Índia	A adição de bagaço de cana-de-açúcar aumentou mais a resistência imediata, precoce e tardia quando comparado com o solo estabilizado com cal.
James et al. (2018)	Cal, açúcar mascavo e pó de noz	Índia	A adição de pó de noz resultou no aumento na resistência do solo estabilizado.
Silva (2018)	Cinza de casca de arroz e cal	Agrestina/PE	Redução significativa da expansão, influenciando nas características físicas e químicas.
Constantino (2018)	Cinza de casca de arroz	Paulista/PE	Redução da expansão "livre" e a da tensão de expansão.
Liu et al. (2019)	Cinza de casca de arroz e resíduo de carboneto de cálcio	China	O mecanismo apresentou eficiência de substituição, reação de coagulação e troca iônica.

**Tabela 1:** Evolução da estabilização química em solos (continuação).

<b>AUTOR</b>	<b>ADITIVO</b>	<b>LOCAL</b>	<b>RESULTADOS DAS PESQUISAS</b>
Bezerra (2019)	Cinza de casca de arroz (CCA)	Brejo da Madre de Deus/PE	Com a adição da CCA, observou uma redução da expansão “livre” e da tensão de expansão do solo. A porcentagem que se mostrou eficaz para garantir a estabilização do solo foi de 20%.
Lacerda (2019)	Cinza de casca de arroz (CCA)	Cabrobó/PE	Foram analisados dois solos C1 com baixa expansividade e C2 com média expansividade, com o acréscimo de 10% de CCA em C1, observou a redução da expansão e da tensão de expansão e C2 apresentou redução da tensão de expansão com 8% de CCA. Além de haver uma redução na resistência a tração nos dois solos em todas as combinações de CCA.
Drumond (2019)	Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA)	Paulista/PE	Com a inserção da CBCA o solo apresentou redução da expansão “livre” e pressão de expansão, com isso esse aditivo pode ser utilizado dependendo das características do projeto.
Zhang, Zhang e Hong (2019)	Álcool polivinílico e carbonato de potássio	-	Todos os resultados mostraram que a combinação é capaz de estabilizar o solo expansivo natural, aumentar a resistência ao cisalhamento, e possível pulverizar diretamente a solução estabilizadora na superfície do solo para formar uma camada relativamente espessa do solo expansivo estabilizado.
Naseem <i>et al.</i> (2019)	Pó de borracha de pneu e pó de forno de cimento	-	Êxito com a adição de 5% de pó de borracha de pneu e 10% de pó de forno de cimento na estabilização no solo, do ponto de vista das características de plasticidade e resistência.
Pongsivasathit, Horpibulsuk e Piyaphipat (2019)	Cimento	Tailândia	Estudaram a influencia do acréscimo do percentual de cimento do em três tipos de solo, de laterita, areia e argila, obtendo resultados satisfatórios.
Marques, Consoli e Festugato (2019)	Cimento	Porto Alegre/RS	Os resultados mostraram que o tipo de cura tem influência sobre a superfície de escoamento e rigidez da areia cimentada artificialmente.
AMU <i>et al.</i> (2020)	Cinza de palha de cana de açúcar no solo estabilizado com cal	Nigéria	Objetivo de melhorar as condições geotécnicas das estruturas do solo.
Rosales <i>et al.</i> (2020)	Vanomateriais comerciais	Espanha	Melhora no comportamento da camada de sub-base estabilizada. Através da avaliação do ciclo de vida, o uso de nanomateriais reduz o impacto ambiental associado à estabilização do solo.

**Tabela 1:** Evolução da estabilização química em solos (continuação).

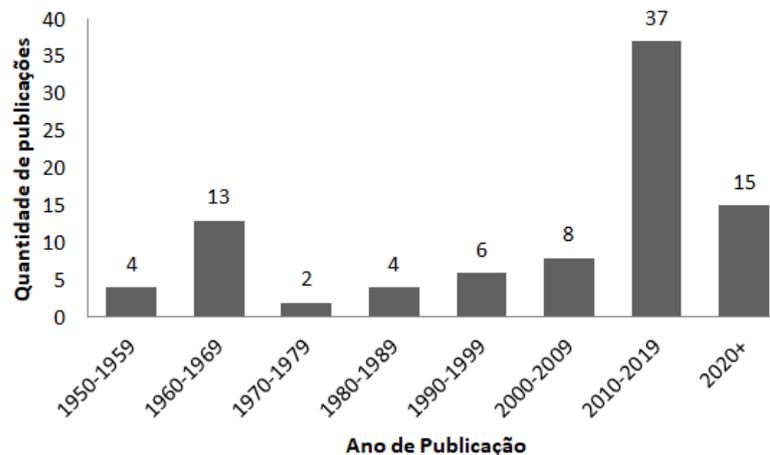
<b>AUTOR</b>	<b>ADITIVO</b>	<b>LOCAL</b>	<b>RESULTADOS DAS PESQUISAS</b>
Sofwan e Nurdin (2020)	Cimento e óxido de ferro.	-	Melhoria da capacidade de carga de um solo expansivo
Bezerra (2020)	Areia, Cal e Cinza de Casca de Arroz (CCA)	Paulista/PE	Os resultados obtidos com a adição de areia, cal ou CCA indica que o método promove a redução do processo de fissuração por ressecamento em virtude da interação das partículas do solo com os materiais.
Scheuermann Filho, Sacco; Consoli, (2020)	Pó de vidro moído e limão de carboneto	Porto Alegre/RG	Obtiveram-se resultados satisfatórios para fins de estabilização de solo, principalmente se utilizar pós de vidro mais finos.
Guedes et al. (2021)	Cimento	Paulista/PE	Estudo de uma nova metodologia de dosagem, onde os resultados exibiram o aumento da resistência em decorrência do aumento do teor de cimento e com a diminuição da porosidade.
Al-atroush <i>et al.</i> (2021)	espuma de poliuretano hidrofóbica	-	Redução do potencial de expansão e fissuração por retração.
Dinesh, Indhumathi e Pichumani (2021)	escória de cobre e cinza de serragem	-	Resultados satisfatórios para estabilização do solo. O uso de resíduos sólidos como aditivos estabilizadores ajudaria diretamente na diminuição dos impactos ambientais.
Martinatto, (2021)	Cerâmica vermelha e cal de carbureto	Osório/RG	Onde apresentou potencial para a utilização em camada de pavimento, pois o desempenho mecânico foi compatível.
Scheuermann Filho et al. (2021)	Vidro moído e carboneto de cal	-	A temperatura de cura foi o fator maior influência relacionada à resistência, rigidez e peso unitário seco.
Torfi, Khayat e Horpibulsuk, (2021)	Alginato de sódio	Irã	Os resultados testes microestruturais no solo estabilizado confirmaram a presença das ligações de cimentação, consequentemente o aumento das forças entre as partículas e a redução da expansão.
Alencar (2022)	Cimento e Resíduos sólidos da saúde (RSS)	João Pessoa/PB	Tanto o cimento, quanto RSS apresentou melhoras na resistência do solo. E a utilização de 20% cinzas de RSS demonstrou ser viável tecnicamente para a estabilização química do solo-cimento em sub-bases e bases de pavimento.
Moraes (2022)	Lignosulfonato de cálcio	Porto Alegre/RS	Os resultados mostraram grande efeito do tempo de cura na resistência e melhoramento da dispersibilidade das amostras.
Lima et al. (2022)	Cinza do bagaço de cana de açúcar e cal hidratada	Barretos/SP	Ao adicionar de 2% de cal ao solo e 5% de cinza do bagaço de cana de açúcar, obteve a estabilização do solo laterítico, alcançando um CBR de 82%, contudo é viável a aplicação desse resíduo para estabilização de solos.

**Tabela 1:** Evolução da estabilização química em solos (continuação).

AUTOR	ADITIVO	LOCAL	RESULTADOS DAS PESQUISAS
Sidiq et al. (2023)	Enzimas e cimento	Austrália	A utilização de cimento em combinação com o material enzimático foi eficaz na estabilização do solo, conforme verificado por testes de laboratório e avaliações de campo.

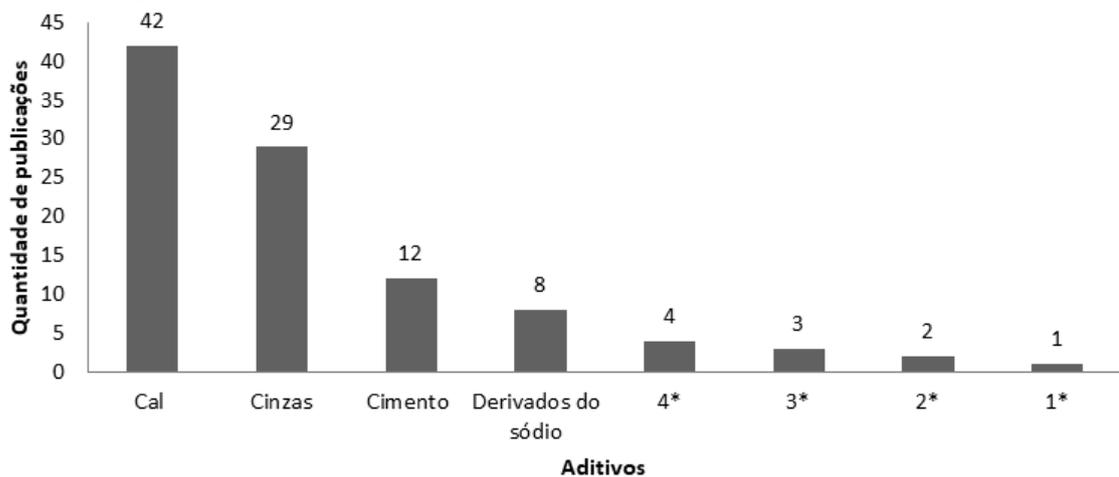
**Fonte:** Adaptado de Medeiros, Ferreira e Bello (2023)

Na década de 2010, o volume de estudos sobre estabilização química dos solos foi bem maior do que em outras décadas (Figura 3), podendo ser atribuído ao avanço do conhecimento da interação entre solo e diferentes aditivos, e à necessidade de aproveitar materiais que antes poderiam não ser considerados, por falta de conhecimento e/ou estudo. Com o passar do tempo, os terrenos que possuem solos com boas propriedades vão sendo ocupados, e os terrenos disponíveis para construção são aqueles que apresentam solos problemáticos, ou seja, solos que precisam passar por algum tratamento (MEDEIROS, FERREIRA E BELLO, 2023).

**Figura 3:** Evolução dos estudos publicados sobre estabilização de solos, por décadas.

**Fonte:** Adaptado de Medeiros, Ferreira e Bello (2023)

Na Figura 4 são apresentados os tipos de aditivos e as respectivas quantidades de estudos realizados. Destaca-se que vários estudos utilizaram mais de um tipo de aditivo, na maioria das vezes, com o objetivo de comparar os resultados. Observa-se que o uso de cal para estabilização de solos foi e ainda é amplamente estudado.

**Figura 4:** Estudos publicados sobre estabilização de solos por tipo de aditivo

**Fonte:** Adaptado de Medeiros, Ferreira e Bello (2023)

Observação: Aditivos utilizados em quantidades repetidas:

4\*- Cloretos, Escórias e Pós;

3\*- Fibras e Bagaço de cana-de-açúcar;

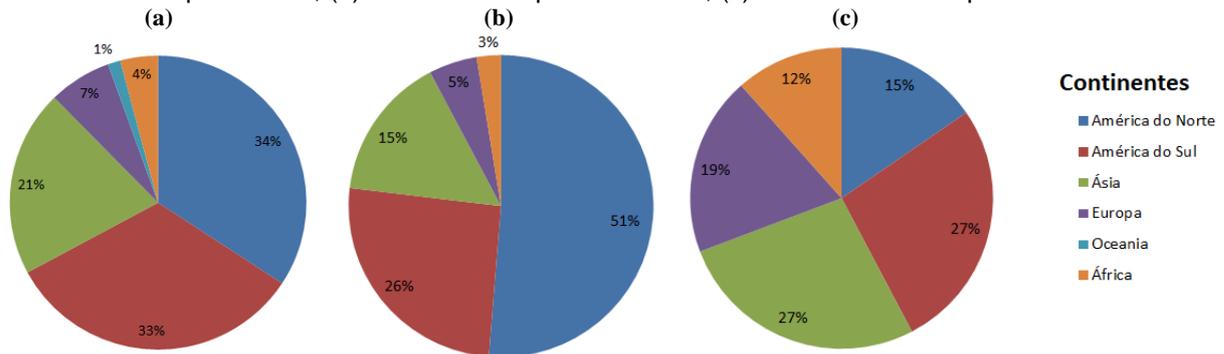
2\* - Ácidos, Carbonatos, Fibras, Óxidos e Resíduos;

1\* - Acetado de polivinila, Açúcar mascavo, água do mar, álcool polivinílico, Areia, Carboneto de cálcio, Emulsão Asfáltica, Enchimento de Aluminato, Espumo de poliuretano hidrofóbica, Gesso, Sílica ativa, Nanomateriais comerciais, resíduos sólidos de saúde, lignosulfonato de cálcio e enzimas.

Existe uma tradição do uso da cal para estabilizar o solo por tratar-se de um produto industrializado e disponível em todas as regiões, no qual ocorre a reação pozolânica com o tempo. A utilização de aditivos alternativos (por exemplo: cinzas, fibras, resíduos sólidos) depende da sua disponibilidade local, sendo mais uma questão de redução de um passivo ambiental do que fornecimento em escala industrial (MEDEIROS, FERREIRA E BELLO, 2023).

Nas Figuras 5a, 5b e 5c são mostrados por continente, o percentual dos estudos publicados, do uso da cal e o uso de cinzas, respectivamente. Verifica-se que 34% dos estudos publicados sobre estabilização química de solos são oriundos do continente norte-americano, seguido por 33% do continente sul-americano e 21% do continente Asiático. O continente Europeu, Africano e Oceania somam juntos 12% dos estudos.

**Figura 5:** Estudos publicados sobre estabilização química de solos, percentual por continente: (a) de estudos publicados; (b) do uso da cal por continente; (c) de uso de cinzas por continente.



**Fonte:** Adaptado de Medeiros, Ferreira e Bello (2023)

Quanto aos estudos observar-se os percentuais que utilizaram a cal como aditivo, 51% dos estudos são de origem norte-americana, seguido por 26% do continente sul-americano e 15% da Ásia. O continente europeu e o africano somam juntos 8% dos estudos. Já quanto ao uso de cinzas, a América do Sul e a Ásia detêm 27% dos estudos, cada, seguidos por 9% da Europa, 15% da América do Norte e 12% da África. Nota-se, portanto, a preocupação em utilizar resíduos, a maioria de origem agrícola, atividade dominada pela América do Sul e Ásia, para realizar a estabilização do solo (MEDEIROS, FERREIRA E BELLO, 2023).

### 2.1.3.2. Estabilização química em solos no Brasil

Segundo Petry e Little (2002), as empreiteiras, arquitetos e engenheiros, tentaram de muitas formas realizar a estabilização dos solos, onde os procedimentos foram baseados em tentativas e erros. Inicialmente utilizavam a estabilização mecânica, mas verificou-se também a necessidade de alteração das propriedades físico-químicas dos solos para estabilizá-los.

De acordo com Mahler (1994) as primeiras menções de solos expansivos no Brasil em um estudo no Recôncavo Baiano em um solo de Massapê feito por Sobral (1956). Após esse estudo, vários outros foram desenvolvidos, como Bezerra (1976) que estudou a durabilidade de solos lateríticos estabilizados com cimento, cal e asfalto diluído. Presa (1978) expôs seu trabalho sobre fundações em solos expansivos acrescentando sobre a necessidade de se realizar a estabilização desse tipo de solo, para evitar problemas nas construções. Aflitos (1981) apresenta sobre a influência de aditivos químicos em propriedades selecionadas e de engenharia de solos vermelhos tropicais do Norte e Nordeste do Brasil, onde a cal se mostrou eficiente na melhoria das propriedades de plasticidade, resistência e capacidade de

suporte de carga. Ao longo dos anos, outros aditivos foram analisados como emulsão asfáltica (SANTOS, 2009) resíduo de mármore (TENÓRIO, 2018), cinza de casca de arroz (BEZERRA, 2019; CONSTANTINO, 2018; LACERDA, 2019; SILVA, 2018) e cimento (GUEDES *et al.*, 2021).

Em Pernambuco, estudos foram realizados quanto ao uso de cal hidratada e cinza de casca de arroz como aditivos químicos, são eles: Barbosa (2013), Paiva, (2016), Ataíde (2017), Tenório (2018), Constantino (2018), Silva (2018), Lacerda (2019) e Bezerra (2020).

Barbosa (2013) estudou o comportamento de um solo expansivo da cidade de Cabrobó-PE no seu estado natural e estabilizado com cal. Para essa análise foram realizados ensaios de caracterização física, química, análise termogravimétrica, e ensaios edométricos simples e duplos. Para aferir a tensão de expansão e expansão “livre” do solo natural e estabilizado com a cal com os seguintes percentuais de 3%, 5% e 7% e constatou que o acréscimo de 7% de cal hidratada ao solo obteve-se a estabilização com relação a expansão, acrescentando ainda que houve melhoras nas propriedades mecânicas do solo estabilizado.

Paiva *et al.* (2016) verificaram que o teor de cal de 7% indicado pelo critério de Eades e Grim (1966) não estabilizou o solo expansivo de Ipojuca-PE quanto a expansão “livre” e tensão de expansão, requerendo maior teor de cal (11%). A cal foi eficiente para reduzir a expansão livre e tensão de expansão do solo a valores nulos. Isto é atribuído à capacidade de cimentação do solo tratado com a cal que reduz a tendência de absorção de água das argilas saturadas com cálcio.

Ataíde (2017) fez uma análise dos resultados, do ponto de vista econômico, utilizando cal e areia para estabilizar um solo expansivo de Ipojuca-PE, onde obteve que a utilização da areia como agente estabilizante apresentou melhores resultado do que a cal hidratada, a adição desses aditivos causou a redução da expansão livre e também da tensão de expansão das misturas, isso devido, a diminuição da fração de argila, aumento das frações de silte e areia.

Tenório (2018) empregou a cal hidratada e o resíduo de mármore como aditivos para realizar a estabilização de um solo expansivo averiguando a influência sobre a expansão e resistência do solo. Utilizou o solo de Paulista-PE e adicionou os seguintes percentuais 30%, 40% e 50% de resíduo de mármore e 2%, 4%, 6% e 8% de cal da massa seca. Através dos ensaios pode-se observar que o resíduo de mármore conteve a expansão solo, entretanto ele não apresentou reações químicas

comportando-se como um aditivo inerte. Através dos ensaios averiguou que o resíduo proporcionou um ganho de 13KPa na coesão efetiva do solo. Já os solos estabilizados com a cal apresentaram aumento de resistência à compressão, capacidade de controlar a expansão e desenvolvimento de reações pozolânicas.

Constantino (2018) analisou também o solo de Paulista-PE, assim como Tenório (2018), só que adicionou cinza de casca de arroz como aditivo estabilizante com os seguintes percentuais, em peso, 2%, 4%, 6%, 8% e 10%, realizando o comparativo do solo natural e o solo com o aditivo. Obtendo uma redução de 80% da expansão “livre”, 91% da tensão de expansão do solo natural e um ganho na resistência a compressão simples e diametral para o percentual de 4%. E para que não haja danificações em construções o percentual de 8% mostrou-se mais indicado.

Lacerda (2019) investigou o comportamento de dois solos expansivos da cidade de Cabrobó em seu estado natural e com cinza de casca de arroz (CCA), com os seguintes percentuais, de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% de forma a diminuir a expansão do solo, o primeiro (C1) solo apresentou baixa expansividade e o segundo (C2) solo apontou média expansividade. No C2 com a adição de 8% observou a redução da expansão e já o acréscimo de 10% de CCA houve redução na expansão “livre” e na tensão de expansão. A adição de CCA no solo C1 reduziu a resistência à compressão, entretanto no solo C2 há um aumento da resistência com tempo de cura de 28 dias, houve uma redução nos dois solos com relação a resistência a tração. E comparou os resultados obtidos com o de Barbosa (2013), concluído que tanto a CCA e cal são competentes para reduzir a expansividade do solo.

Silva, Bello e Ferreira (2020) adicionou ao solo expansivo Agrestina-PE cal-hidratada nas proporções em de 3%, 5%, 7%, 9%, 11% e 13% e com cinza de casca de arroz (CAA) em peso, de 2%, 4% 6% 8%, 10%, 12% e 14%. O solo, em estado natural, apresentou expansão “livre” de 6,58%, com sobrecarga de 10 kPa e tensão de expansão média de 155 kPa. A substituição do solo natural por Cal-Hidratada e CCA reduziu a expansão, influenciando suas características físicas e químicas, mostrando-se eficaz no combate a expansão. A tensão de expansão do solo diminuiu à medida que se aumentava os teores das misturas, alcançando valores próximos a 1 kPa para porcentagem de 9% de cal-hidratada. O teor de 14% de CCA adicionado ao solo reduziu de expansão “livre” a valores 1,5%, reduzindo a tensão de expansão a valores inferiores a 10 kPa.

Bezerra (2020) analisou o processo de propagação de fissuras no solo de Paulista–PE e de sua mistura com areia, cal hidratada e cinza de casca de arroz (CCA) verifica que propagação de fissuras nas misturas ocorre em forma de “T” ou “Y” em toda a superfície da amostra juntamente com sua contração. Todos os índices geométricos das fissuras aumentaram com a diminuição da umidade e próximos ao fim do ensaio diminuíram, comportamento encontrado no solo natural e nas misturas. O processo de propagação de fissuras devido à secagem desenvolve-se em três estágios de contração: inicial, primário e secundário. No inicial, a amostra perde umidade superficial sem ocorrer contração ou aparecimento de fissuras significativas. O segundo estágio corresponde à fase de maior aumento dos índices geométricos com o tempo devido à redução de umidade. Na contração secundária, há redução dos índices geométricos com o tempo. Os resultados sugerem que a adição de areia, cal ou CCA é um método que possibilita a redução do processo da fissuração por ressecamento devido à interação das partículas do solo com esses materiais que aumenta a resistência ao fissuramento e dos três materiais adicionados ao solo a CCA apresentou menores índices geométricos no processo de propagação de fissuras com o tempo devido ao processo de secagem.

Guedes *et al.* (2021) utilizou cimento como aditivo e propôs uma nova metodologia de dosagem, onde os resultados exibiram o aumento da resistência em decorrência do aumento do teor de cimento e com a diminuição da porosidade. Os resultados desses estudos mostraram a resistência à compressão simples em solos expansivos com diversos teores de cimento e pesos específicos baseados na metodologia de dosagem com base no índice porosidade/teor volumétrico. Com esse estudo chegou a seguintes considerações: que com o aumento do teor de cimento a resistência à compressão do solo melhora consideravelmente, a aplicação do índice  $\eta/Civ$  (porosidade pelo teor volumétrico de cimento) retificado pelo coeficiente 0,26 é eficiente para antecipar a resistência à compressão do solo com base na curva de dosagem que associa a porosidade e o teor do cimento, já que percebeu que o efeito do peso específico do solo e o teor de cimento interferem na resistência à compressão.

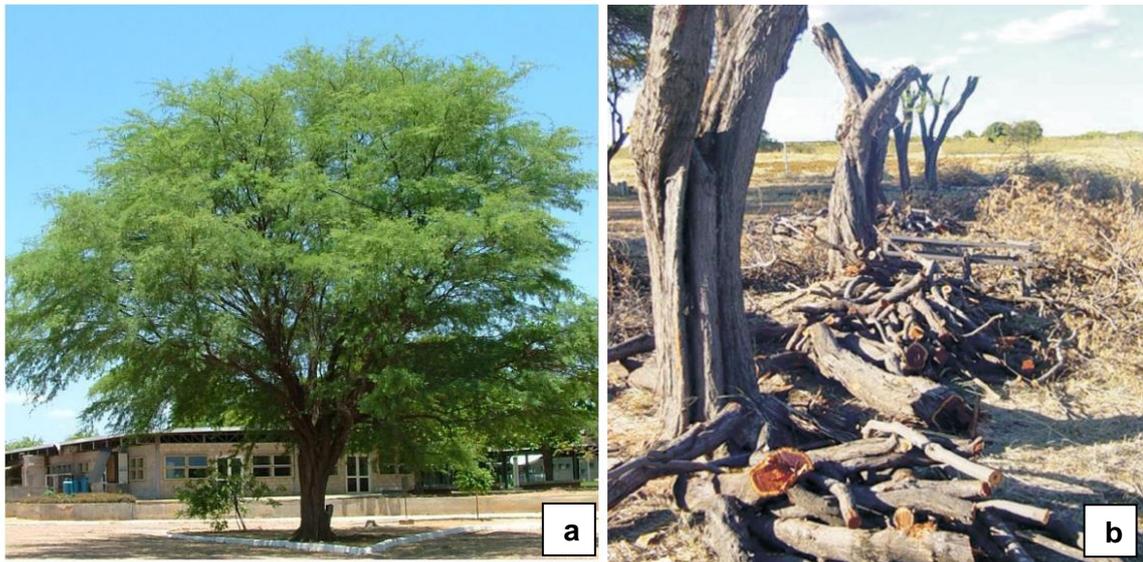
## **2.2 Cinzas de lenha de algaroba**

A algaroba ou algarobeira é uma árvore da família das leguminosas, podendo ser encontrada em três continentes: América, Ásia e África, possuindo mais de 40

espécies conhecidas. Ela foi integrada no Brasil, especificadamente no município de Serra Talhada no estado de Pernambuco no ano de 1942, com sementes trazidas do Peru. É uma árvore que possui uma altura que pode chegar de 6 m a 15 m, tronco com o diâmetro variando de 40 cm a 80 cm e a copa que varia de 8 m a 12 m de diâmetro (RIBASKI *et al.*, 2009).

Ainda de acordo com Ribaski *et al.* (2009), essa espécie (Figura 6.a) se adapta bem em regiões que apresentam uma precipitação pluviométrica variando entre 150 mm e 1200 mm por ano, resistentes há longos períodos de estiagem, com períodos superiores a nove meses de seca e se desenvolve em diferentes tipos de solos, como rochosos, arenosos e salinizados. É considerada uma árvore de uso múltiplo, pois seus frutos são importantes fontes de proteína e carboidrato para os animais, principalmente em regiões mais secas. Sua madeira é durável, sendo manuseada para mourões, tábuas, dormente, estacas para cercas, lenha e carvão.

**Figura 6:** Árvore (a) e lenha (b) de algaroba



Fonte: Ribaski *et al.* (2009)

De acordo com Drumond, Pires e Brito (1984), a lenha de algaroba (figura 6.b) apresenta um bom rendimento gravimétrico de carbonização na ordem de 43% e geração de cinza de 1,6%, com isso, torna-se uma solução viável como matriz energética, quando comparada a outras espécies.

A lenha de algaroba, no agreste do estado do Pernambuco, é aplicada como fonte de energia por motivo de fácil aquisição e baixo custo, e sendo liberada para por não ser uma árvore nativa da flora brasileira. A lenha é utilizada no APL (Arranjo

Produtivo Local) de confecções, no processo de aquecimento de água para o tingimentos dos jeans (LIMA, 2019). De acordo com a pesquisa realizada pela Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Pernambuco (CPRH, 2005), apresentou em seu levantamento de 59 lavanderias visitadas, verificou que a lenha correspondia a 69% dos combustíveis utilizados como fonte de energia, para geração de vapor e água quente.

Há uma estimativa que a queima da madeira produz cerca de 1560 ton/mês de cinzas da lenha de algaroba, levando em conta que mais de 200 lavanderias estão registradas na região muitas vezes resultando no descarte inadequado desse resíduo no meio ambiente (LIMA, 2019; MELO, 2012; MOURA, 2017), como se pode observar na Figura 7.

As cinzas leves de algaroba (CLA) são ricas em carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), com morfologia esférica e superfície discretamente enrugada e partículas com dimensões inferiores a  $75 \mu\text{m}$  (NASCIMENTO, 2014). Há dois tipos de cinzas geradas nas caldeiras das lavanderias do APL de Pernambuco, a CT (cinzas de topo) e CB (cinzas de base).

**Figura 7:** Descarte irregular de cinzas de algaroba



**Fonte:** Lima (2019)

Diversas pesquisas foram realizadas sobre o uso da CLA, entretanto nenhuma pesquisa para o melhoramento das propriedades físicas e mecânicas do solo, entre elas pode-se citar:

- Melo (2012) avaliou a incorporação de CLA em argamassas de revestimento;

- Leloup (2013) estudou o efeito da adição de lodo têxtil e CLA em argamassas de cimento Portland;
- Santos (2014) analisou o uso a CLA em massa cerâmica para revestimento, através da substituição parcial do feldspato;
- Mota (2014) investigou a incorporação de CLA em concreto seco moldado sob pressão;
- Nascimento (2014) avaliou os efeitos da substituição da cal hidratada por CLA em argamassas de revestimento;
- Cavalcanti (2016) avaliou a resistência à compressão simples e absorção de água em tijolos vazados de solo-cimento feitos com a substituição parcial do cimento pela CLA;
- Pires (2016) estudou o desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento por CLA;
- Cavalcante (2016) averiguou a substituição parcial do cimento por CLA em tijolos de solo-cimento;
- Moura (2017) analisou a incorporação de CLA em concreto betuminoso usinado a quente;
- Melo (2018) utilizou a CLA na fabricação de bloco de solo-cal;
- Nascimento *et al.* (2019) averiguaram a influência do uso da cinza nos mecanismos de hidratação e formação das principais fases hidratadas do cimento;
- Lima (2019) estudou a incorporação da CLA em concretos auto-adensáveis.

Conforme observado, a CLA vem sendo bastante utilizada para substituir o cimento e também a cal, e esses são aditivos que são bastante utilizados para realizar a estabilização de solos.

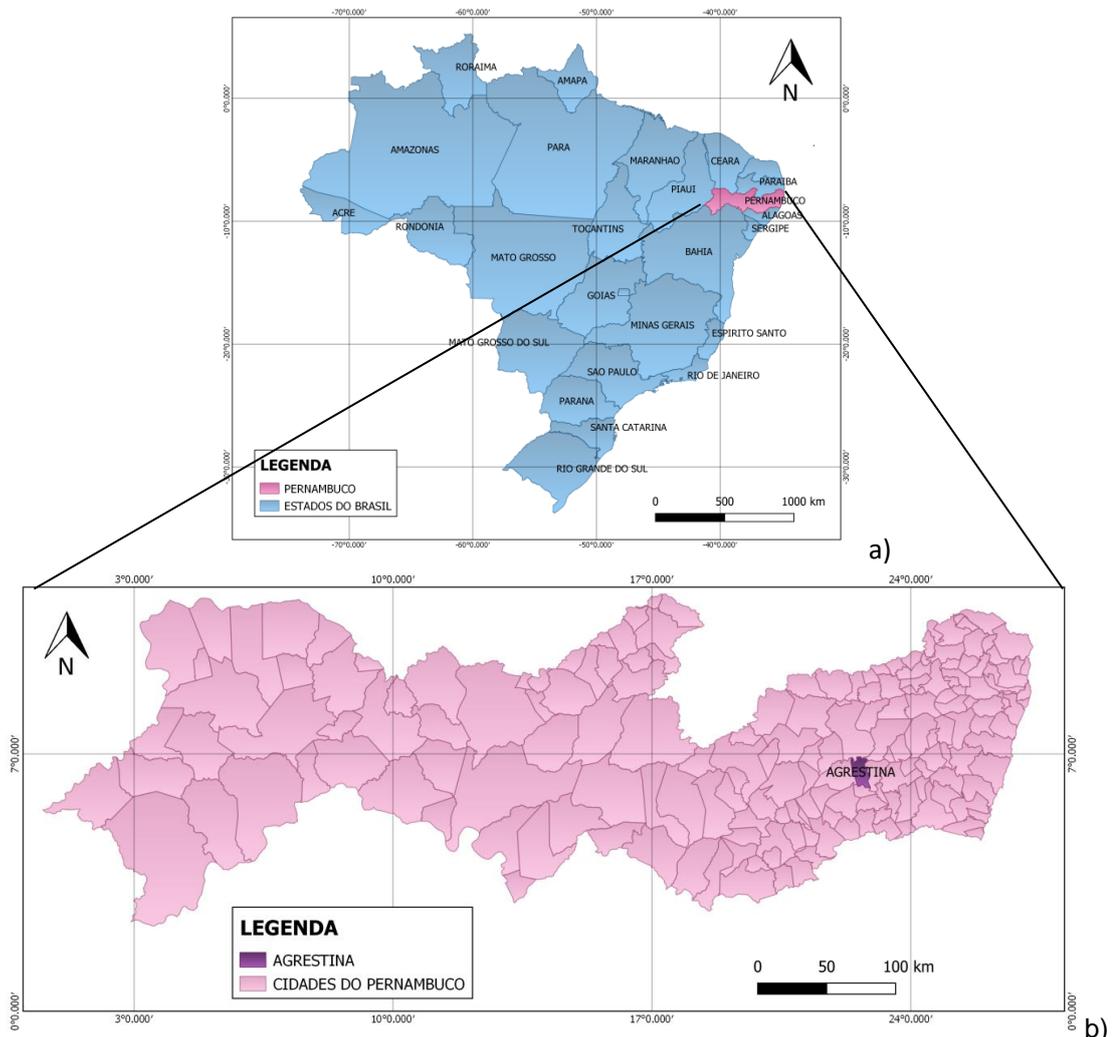
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão apresentadas a área de estudo, caracterização do solo e da CLA, além da descrição da metodologia utilizada nesta pesquisa e o programa experimental.

#### 3.1 Área de estudo

O município de Agrestina que de acordo com o censo de 2010 o possui uma população com 22.679 habitantes, área territorial de 200.369 Km<sup>2</sup> e possui um bioma de Caatinga e Mata Atlântica (IBGE, 2022). Está situada a 149 km da sua Capital Recife. Nas Figuras 8a e 8b são mostradas a localização do estado do Pernambuco e da cidade de Agrestina, respectivamente.

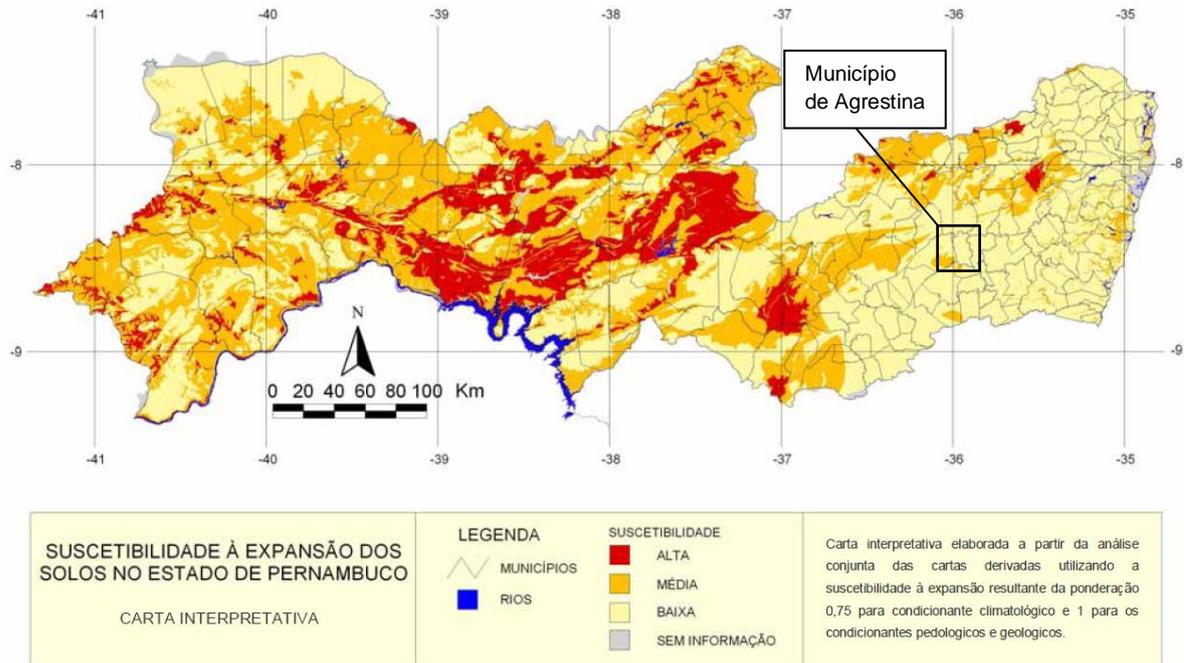
**Figura 8:** (a) Localização do estado de Pernambuco no mapa do Brasil e (b) da Cidade de Agrestina no Pernambuco



Fonte: Autora (2023)

O município de Agrestina apresenta potencial de expansão, entretanto é considerado baixo, de acordo com o mapa de susceptibilidade à expansão dos solos no estado de Pernambuco de Amorim (2004) (Figura 9).

**Figura 9:** Localização do município de Agrestina no mapa de susceptibilidade à expansão dos solos



**Fonte:** Adaptado de Amorim (2004).

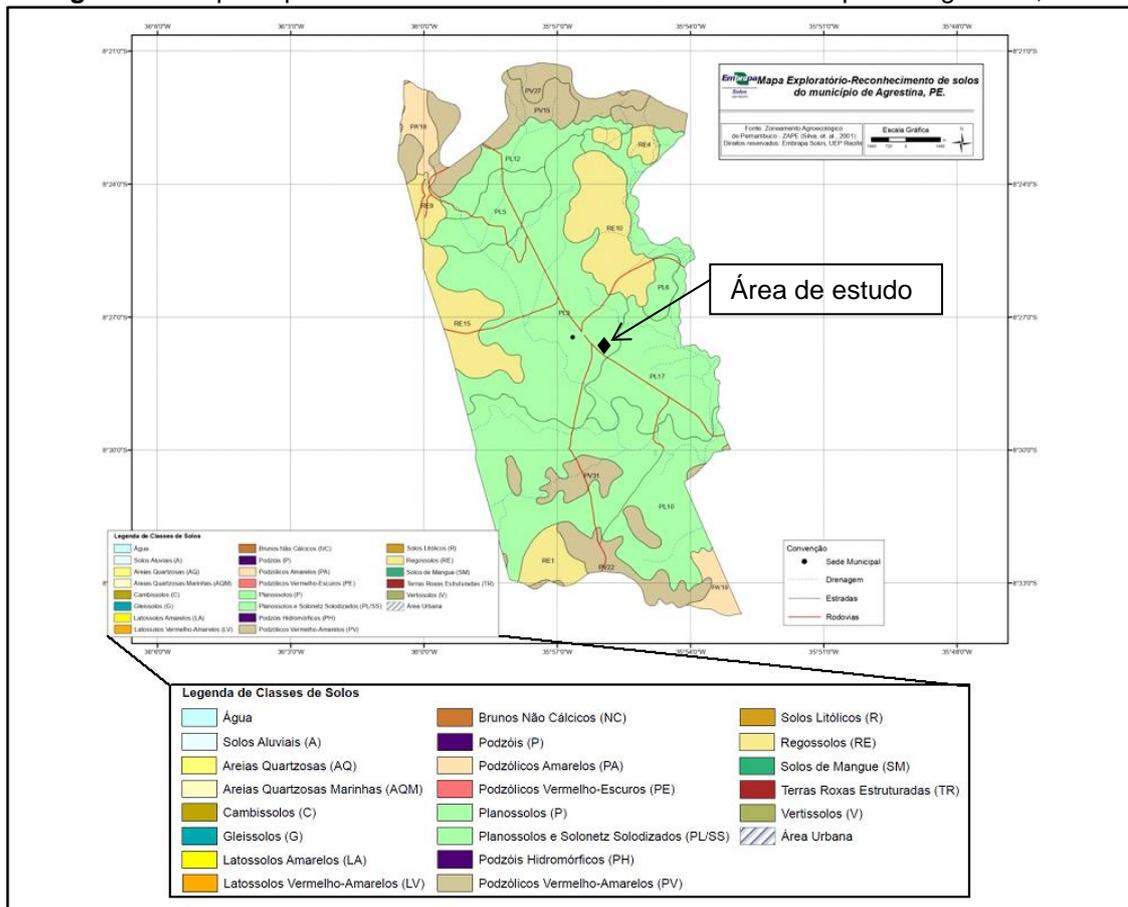
O Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Município de Agrestina, PE (Figura 10), apresenta as classes de solos (AGEITEC, 2022). No qual se pode observar grande quantidade de solos do tipo Planossolos e Solonetz Solodizados (PL/SS), bem como Solos Podzólicos Amarelos (PA), Podzólicos Vermelhos-Amarelos (PV) e Regossolos (RE).

Normalmente, o Planossolo ocorre nos terraços de rios ou riachos ou ainda no terço superior de encosta, conseqüentemente, há a possibilidade de apresentar ou não hidromorfismo. Mediante o exame de textura pode-se facilmente observar a mudança textural entre os horizontes, superficial e subsuperficial, pois ocorre de forma brusca (PRADO, 1995). Já o Solonetz Solodizado também pode ser encontrado em terraços de rios e riachos, entretanto, em áreas que apresentam topografia mais suave. É notável a diferença dos teores de argila entre os horizontes superficial e subsuperficial (EMBRAPA, 2006).

Os Planossolos e Solonetz Solodizados são solos minerais que apresentam

semelhanças físicas e morfológicas, possuindo como principal característica o horizonte B que possui: estrutura prismática, podendo apresentar partes maciças de tamanho variado; coloração acinzentada, estrutura adensada (dura ou extremamente dura quando secas), além de apresentarem uma transição abrupta com relação da textura do horizonte A para o horizonte B. A diferença entre os solos está relacionado à saturação por sódio no horizonte B (AMORIM, 2004).

**Figura 10:** Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Município de Agrestina, PE.



Fonte: Adaptado de AGEITEC (2022)

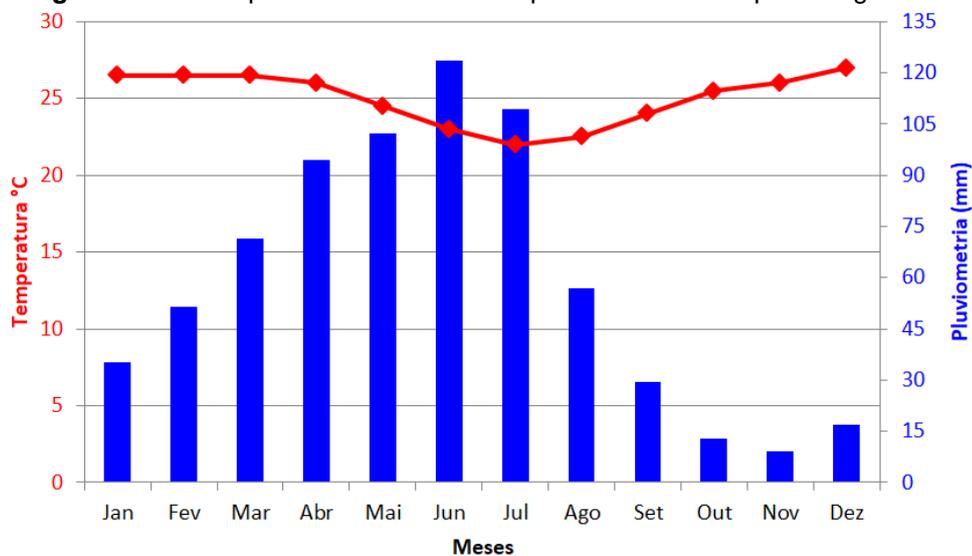
Em Agrestina o clima é tropical, ou seja, região com elevadas temperaturas e alternância entre estações de seca e chuvosa. No mês de novembro teve-se uma precipitação de 9.3 mm, que é o período mais seco, já no mês de junho a média foi de 123.4 mm, apresentando uma variação de 114.1 mm entre mês mais seco e o mais chuvoso, conseqüentemente uma pluviometria que varia consideravelmente ao longo do ano, como exibido na Tabela 2. Levantamento de dados realizados entre Maio de 2022 a Abril de 2023.

**Tabela 2:** Dados pluviométricos e térmicos de Agrestina, relativos a cada mês.

Temperaturas	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>Média (°C)</b>	26.5	26.5	26.5	26	24.5	23	22	22.5	24	25.5	26	27
<b>Mínima (°C)</b>	21	21	21	21	20	19	18	18	19	20	20	21
<b>Máxima (°C)</b>	32	32	32	31	29	27	26	27	29	31	32	33
<b>Chuva (mm)</b>	35.1	51.4	71.4	94.6	102.2	123.4	109.2	56.7	29.3	12.8	9.3	16.8

Fonte: Adaptado do Site weatherspark (2023).

Já 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. Na Figura 11 são apresentados os dados pluviométricos com relação à temperatura em cada mês, expressos numericamente (WEATHERSPARK, 2022).

**Figura 11:** Dados pluviométricos e de temperatura do município de Agrestina.

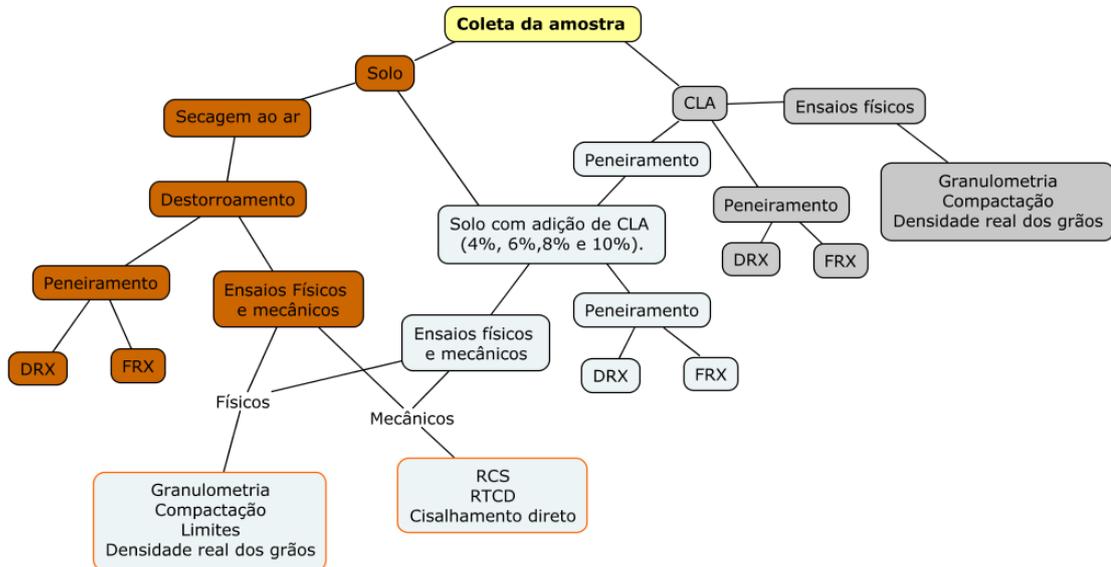
Fonte: Adaptado do Site weatherspark (2023).

### 3.2 Programa experimental

Na Figura 12 apresenta-se o fluxograma das etapas experimentais adotadas nesta pesquisa. O início do programa se deu pela coleta das amostras deformadas, caracterização física da CLA, do solo e das mistura de solo-CLA, seguindo as normas vigentes (tabela 4), pois 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, estes foram ensaiados com as idades de 0, 7, 14 e 28 dias para os ensaios de compressão simples e

ensaio de tração por compressão diametral, e nas idades de 0, 14 e 28 dias, para o ensaio de cisalhamento direto e feito os ensaios químicos.

**Figura 12:** Fluxograma das etapas experimentais



Fonte: Autora (2023)

### 3.2.1 Coleta de amostras

Inicialmente realizou-se um levantamento das características físicas e mecânicas do solo, a partir do estudo de Silva (2018); Silva et al. (2020), realizado no mesmo local deste estudo. Durante a coleta das amostras, observou-se um horizonte com 3 transições (Figura 13). O primeiro horizonte possuía 40 cm de profundidade, composto por um solo mais solto; o segundo, da mesma forma com 40 cm de profundidade, possuindo um solo mais resistente; já o terceiro possuía 1 m de profundidade, composto de rocha alterada, sendo assim, mais resistente que as demais transições.

Os Horizontes A e B apresentam características granulométricas e Limites de Atterberg próximos, sendo considerado como um solo residual, enquanto o Horizonte C é predominantemente grosso e classificado como saprolítico, com fortes indícios de decomposição da rocha sã no local, resultando nos três horizontes. De acordo com o DRX, há a presença de Caulinita, Montmorilonita, Vermiculita e Mica nos horizontes Silva (2018).

**Figura 13:** Perfil do solo de Agrestina e as transições das camadas



Fonte: Silva (2018).

Nesta pesquisa, foi coletado 250 kg de amostra em saco do solo superficial, camada acima do horizonte A (Figura 14) no mesmo lugar em que Silva (2018) coletou suas amostras.

**Figura 14:** Coleta e transporte do Solo em Agrestina/PE



Fonte: Autora (2023)

A CLA foi fornecida pela LGN Lavanderia, localizada no Sítio Cachoeira Seca, Caruaru-PE. A escolha dessa lavanderia foi pelo fato de só utilizarem 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 da caracterização física utilizou-se a CLA da forma que recebemos, mas 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. Na Figura 15 observa-se a CLA antes e após o peneiramento, apresentando uma coloração esbranquiçada.

**Figura 15:** CLA antes (a) e após peneiramento (b)



Fonte: Autora (2023).

### **3.2.2 Descrição dos ensaios**

O solo seco foi misturado com a cinza de lenha de algaroba em porcentagens de 4%, 6%, 8% e 10% de cinza 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, já realizados na UFPE entre eles, Constantino (2018), Lacerda (2019), PAIVA et al. (2016); Silva, Bello e Ferreira (2020), realizando o acréscimo de 2 em 2%, de forma a avaliar gradativamente o comportamento do solo com pequenos acréscimos da CLA.

As amostras foram preparadas seguindo as recomendações da ABNT, NBR 6457/2016 (amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização). Foram realizados nas misturas, os ensaios de

caracterização física, química, mineralógica e mecânica, na tabela 3 apresenta os ensaios realizados, a quantidade de amostras ensaiadas 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 3:** Ensaios realizados, quantidade de amostras e as normas

<b>Caracterização</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Amostras</b>	<b>Normas</b>
<b>Física</b>	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
<b>Química</b>	FRX	6	-
<b>Mineralogia</b>	DRX	6	-
<b>Mecânica</b>	RCS	60	NBR 12025/2012
	RTCD	60	NBR 7222/2011
	Resistência ao cisalhamento direto	45	ASTM D 3080/2011

**Fonte:** Autora (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 (Figura 16).

**Figura 16:** Ensaio de sedimentação



**Fonte:** Autora (2023)

A identificação química do solo, da cinza de lenha de algaroba 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. O equipamento utilizado foi Rigaku

modelo Primini (Figura 17a), no laboratório de química no Centro Acadêmico do Agreste (CAA). Os resultados da varredura semi-quantitativa foram recalculados após a incorporação do valor de perda ao fogo (Figura 17b) e umidade.

**Figura 17:** Equipamento utilizado (FRX) (a) e ensaio de perda ao fogo - Mulfa(b)



Fonte: Autora (2023)

O ensaio de DRX foi realizado com o emprego do Difratômetro 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 2º/min, varrendo o intervalo da angulação de 3º a 42º, utilizando o método convencional (no pó seco).

Para a caracterização mecânica das misturas foi realizado os ensaios de resistência à compressão simples (RCS) seguindo ABNT NBR 12025/2012, de resistência à tração por compressão diametral (RTCD), NBR 7222 (ABNT, 2011) e o ensaio de cisalhamento direto, ASTM D3080 (2011).

Para a realização dos ensaios de RCS e RTCD foram moldados 6 CPs idênticos para cada teor de CLA, sendo 3 CPs para cada ensaio, em um cilindro que contém 100mm de altura e 50 mm de diâmetro. O solo foi secado ao ar, peneirado na peneira nº 4, abertura de 4.8mm e misturado com os diferentes teores de CLA, o cálculo das quantidades a serem utilizadas para a moldagem dos CPs assegura que esses disponham das propriedades volumétricas e estados desejados. A metodologia para realização dos cálculos consiste em fixar o peso específico seco aparente desejado, as medidas do corpo de prova e a umidade ótima pretendida do corpo de prova, com isso, para proceder aos cálculos há necessidade de se conhecer a umidade hidrocópica tanto do solo quanto da cinza de lenha de

algaroba (CLA), para que se realize o cálculo da quantidade de água que será adicionada. A seguir mostra-se o passo a passo do cálculo para a modelagem dos corpos de prova onde se repetiu o processo realizado por (TENÓRIO, 2018).

- I. O percentual do aditivo, CLA, que irá ser adicionado ao solo;
- II. A massa do solo ou solo + aditivo necessária para obtenção da densidade desejada;
- III. A massa de água em peso para elevar a massa solo ou solo + aditivo à umidade desejada.

No procedimento I institui-se o teor de aditivo ( $t$ ) a ser acrescentado ao solo e efetua-se de acordo com a Equação 1 para obter-se o percentual de solo ( $ps$ ) e a Equação (2) o percentual de aditivo ( $pa$ ).

$$ps = \frac{1}{1+t} \quad \text{Equação 1}$$

$$pa = \frac{t}{1+t} \quad \text{Equação 2}$$

No II procedimento utiliza-se o peso específico seco aparente ( $\gamma_d$ ) e o volume do corpo de prova ( $V_{cp}$ ), aplicando-se esses dados na Equação 3, obtém a massa seca ( $m_d$ ) necessária. Com o valor de  $m_d$ ,  $pa$  e  $ps$  obtém-se o valor da massa do solo seco ( $ms_d$ ) através da Equação 4 e a massa do aditivo seco ( $ma_d$ ) pela Equação 5.

$$m_d = V_{cp} * \gamma_d \quad \text{Equação 3}$$

$$ms_d = ps * m_d \quad \text{Equação 4}$$

$$ma_d = pa * m_d \quad \text{Equação 5}$$

No III procedimento utiliza-se a Equação 6 para a determinação da massa de água ( $ma$ ), mas há a necessidade de determinar a anteriormente a umidade hidróscópica do solo ( $u_{s,s}$ ) e do aditivo ( $u_{h,a}$ ), com esses dados e a umidade moldagem ( $u_m$ ) e obtém-se a massa da água em peso.

$$m_a = m_{s_d} * (u_m - u_{s_s}) + m_{a_d} * (u_m - u_{h_a}) \quad \text{Equação 6}$$

Em seguida, misturou-se o solo, o aditivo (CLA) e a água, de forma que ficasse o mais homogêneo possível, por fim realizava a compactação estática por meio do molde e da prensa dos corpos de prova (Figura 18), onde se dividia em 3 camadas de igual massa, com escarificação entre as camadas para garantir uma melhor aderência.

**Figura 18:** Prensa para compactação estática e molde dos corpos de prova



Fonte: Autora (2023)

Após moldados os corpos de prova foram pesados em uma balança de precisão de 0.01g, em seguida foram embalados no plástico filme e papel alumínio para evitar a perda de umidade e devidamente numerados, por teor de CLA, tempo de cura e o ensaio (RCS ou RTCD) (Figura 19), por último levavam os corpos de prova para uma câmara úmida para o processo de cura durante 7, 14 e 28 dias, para impedir mudanças significativas no controle de umidade até o dia do ensaio. Os corpos de prova que não demandavam de tempo de cura eram compactados no mesmo dia do ensaio.

Os corpos de prova tinham que respeitar os seguintes erros máximos para serem utilizados no ensaio de compressão simples e tração por compressão diametral, onde: as amostras tinham dimensões de  $\pm 1\text{mm}$  de altura e  $\pm 0.5\text{mm}$  de diâmetro, teor de umidade de  $\pm 1,0\%$  (o teor de umidade foi medido com a sobra da compactação dos CPs).

**Figura 19:** Corpos de Prova

Fonte: Autora (2023)

Para o ensaio de cisalhamento direto moldou-se corpos de prova com 60 mm de largura, 60 mm de comprimento e 20 mm de espessura. Para a modelagem dos corpos de prova realizou a compactação do solo e solo com aditivo, no cilindro de 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro, com a energia normal de compactação, e em seguida aparou-se as amostras do corpo de prova (Figura 20).

**Figura 20:** Cilindro e Aparamento dos Corpos de prova para o ensaio de cisalhamento

Fonte: Autora (2023)

As amostras forma compactadas assegurando o peso específico máximo aparente e umidade ótima, obtidos através dos ensaios de compactação para cada uma das misturas, pela energia normal. Em seguida, os corpos de prova (Figura 21) foram envolvidos em plástico filme e papel alumínio, numerados por teor de CLA, tempo de cura, a devida tensão normal que será aplicada durante o ensaio e peso

da amostra. Foram armazenados em câmara úmida, para reduzir a perda do teor de umidade durante os tempos de cura que varia de 14 a 28 dias. No total foram moldados 3 corpos de prova para cada teor de CLA e tempo de cura, de forma a obter a tensão de cisalhamento para 50, 100 e 200 kPa de tensão normal.

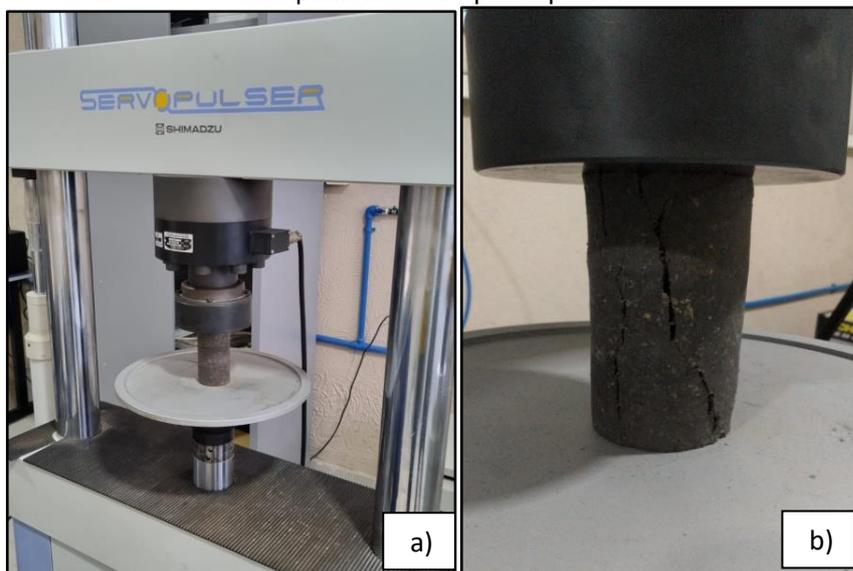
**Figura 21:** Corpos de prova para o ensaio de cisalhamento



Fonte: Autora (2023)

Para a execução dos ensaios de resistência à compressão simples (RCS) utilizou-se a prensa hidráulica Shimadzu com uma velocidade de carregamento de 1% por minuto, ou seja, 1mm por minuto, obtendo assim a força máxima aplicada até o rompimento do corpo de prova. Os ensaios de compressão simples seguiram os métodos apresentados na norma brasileira NBR 12025 (ABNT, 2012) (Figura 22).

**Figura 22:** Etapas do ensaio de compressão simples: a) posicionamento do corpo de prova, b) rompimento do corpo de prova.



Fonte: Autora (2023)

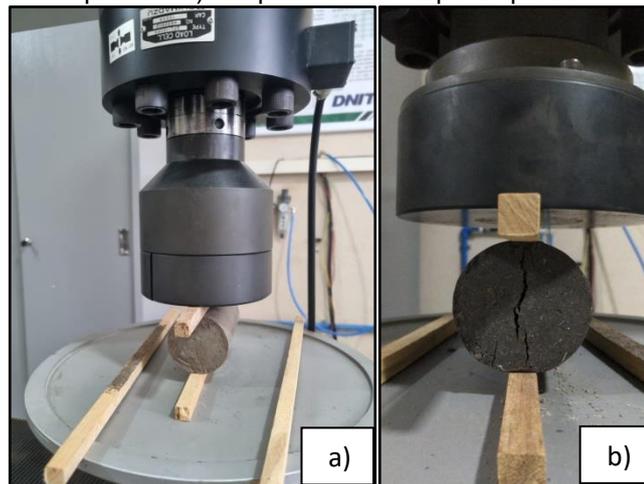
A resistência à compressão simples é a força máxima aplicada até que ocorra a ruptura do material. A partir do valor da força de ruptura ( $F_r$ ) e a área transversal ( $A_T$ ), obtém-se a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) de acordo com a expressão (Equação 7).

$$q_u = \frac{F_r}{A_T} \quad \text{Equação 7}$$

No total foram moldados 60 corpos de prova, moldou-se três corpos de prova para cada tempo de cura e teor de CLA.

Para a execução dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) utilizou-se a mesma prensa do ensaio de compressão simples. Para a realização desse ensaio seguiu a Norma Brasileira NBR 7222 (ABNT, 2010). Na Figura 23, apresenta-se o posicionamento do corpo de prova (a) e o seu rompimento (b).

**Figura 23:** Etapas do ensaio de tração por compressão diametral: a) posicionamento do corpo de prova e b) rompimento do corpo de prova



Fonte: Autora (2023).

Calcula-se a resistência à tração por compressão diametral ( $q_t$ ) através da Equação 8, onde  $F_r$  é a força de ruptura,  $d$  e  $h$  são diâmetro e altura do corpo de prova, respectivamente.

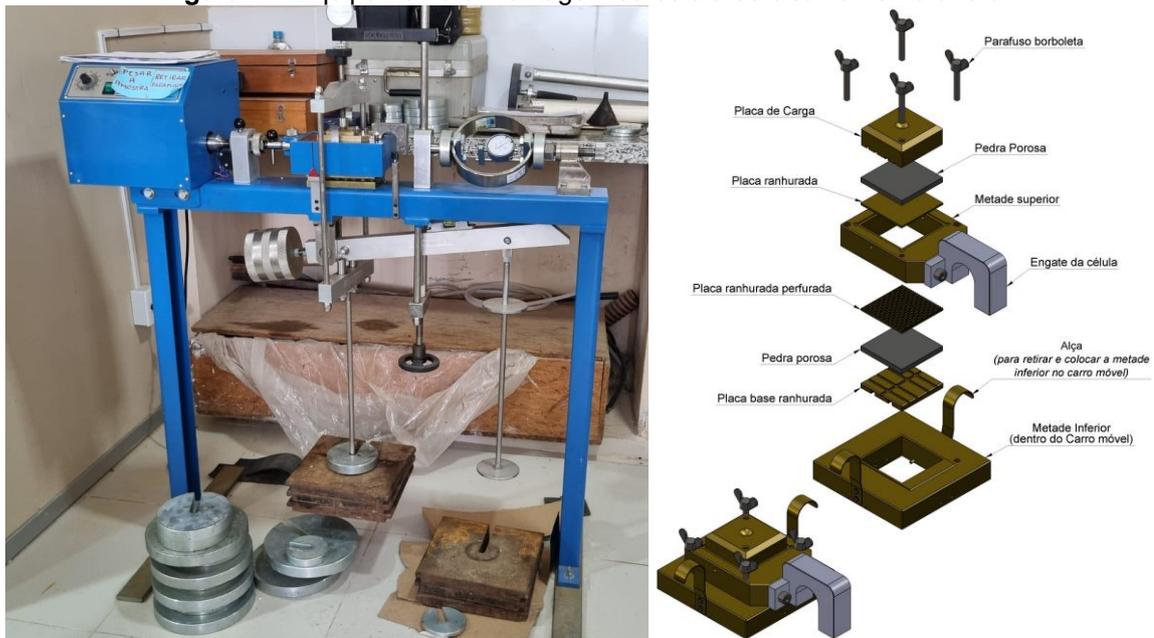
$$q_t = \frac{2 \cdot F_r}{\pi \cdot d \cdot h} \quad \text{Equação 8}$$

No total também foram moldados 60 corpos de prova, moldou-se três corpos de prova para cada tempo de cura e teor de CLA.

Os ensaios de resistência ao cisalhamento direto executados para determinação dos parâmetros de resistência do solo através da envoltória de Mohr-Coulomb seguindo a norma ASTM D3080:2011. Para a realização dos ensaios, utilizou-se um equipamento de cisalhamento da SOLOTEST (Figura 24).

Os corpos de prova foram posicionados dentro da caixa bipartida, com uma velocidade constante de 0.5mm/min, resultando no cisalhamento da amostra. O critério de ruptura do ensaio escolhido foi de 10% de deformação da sua largura, ou seja, de 6mm. Com os resultados obtidos em cada estágio de tensão, pode-se traçar as curvas de tensão cisalhante x deformação horizontal para cada tensão normal sobreposta, com isso, determinar a tensão de cisalhamento máxima referente à ruptura de cada corpo de prova. Com os valores das tensões de cisalhamento máximas, obtém-se a envoltória de resistência do solo e das misturas de solo com CLA, por conseguinte, os valores do ângulo de atrito interno e sua coesão.

**Figura 24:** Equipamento e montagem da célula de cisalhamento direto



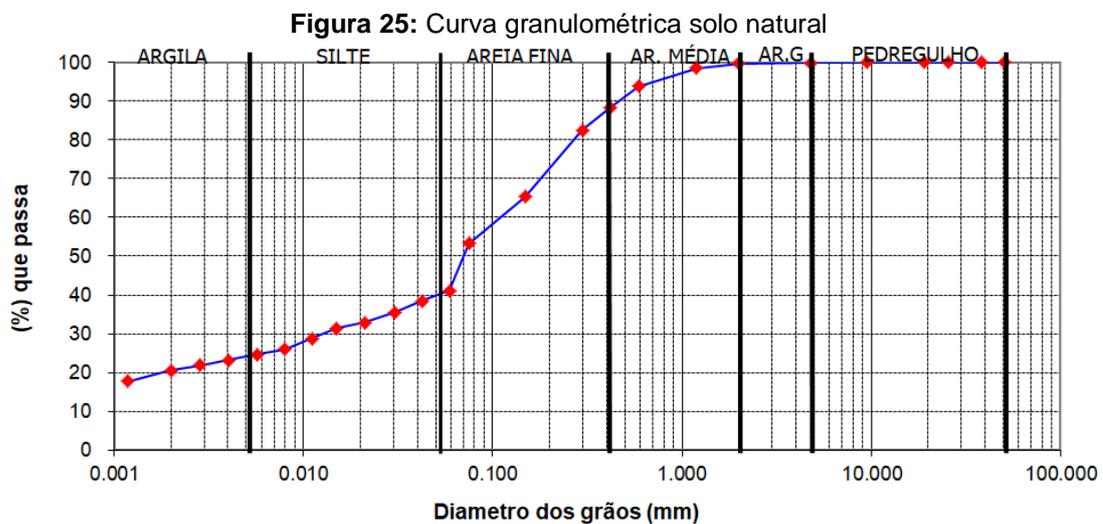
Fonte: Adaptado de SOLOTEST (2023).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo encontram-se os resultados desta pesquisa, os quais compreendem as caracterizações físicas, químicas e mecânicas do solo, CLA e das misturas do solo com CLA, onde na caracterização mecânica foram verificadas as resistências à compressão simples, a tração por compressão diametral e também ao cisalhamento direto, de forma a verificar o comportamento do solo como o incremento da cinza de lenha de algaroba.

### 4.1 Caracterização do solo

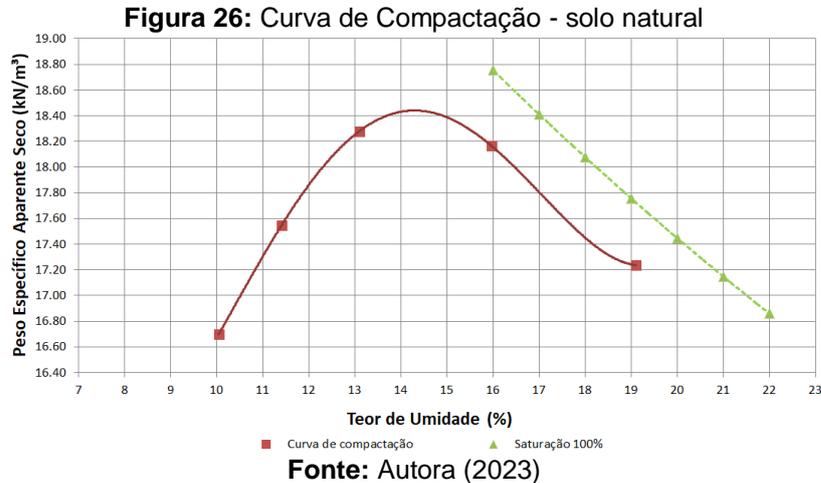
O solo natural apresentou-se bem graduado, com aproximadamente 53% de finos, contendo 23,3% de argila, 30% de silte e 46,6% de areia. A fração de areia é composta por 35,10% de areia fina, 11,32% de areia média, 0,21% de areia grossa e 0,03% de pedregulho (Figura 25).



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/m<sup>3</sup>, como mostra a Figura 26. Na Tabela 4 são apresentados os valores dos parâmetros obtidos a partir dos ensaios de caracterização realizados.

A classificação do solo através do sistema unificado (SUCS) é realizada através de uma carta de plasticidade (Figura 27), em que são inseridos os valores

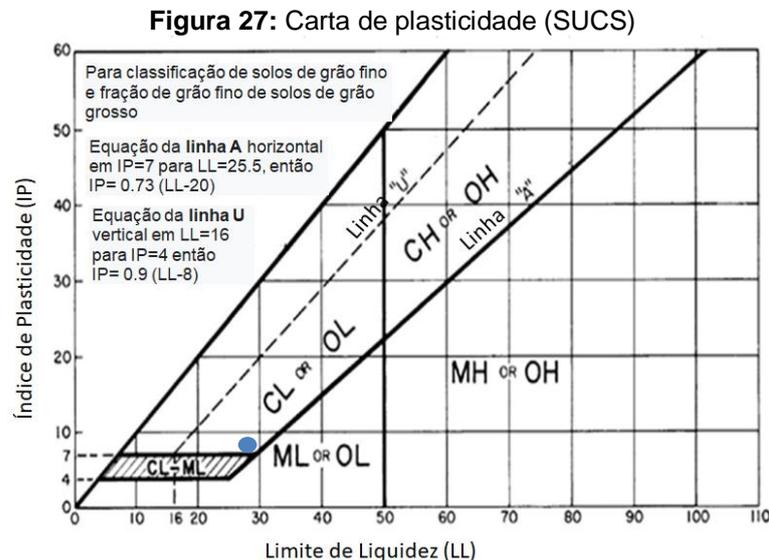
de LL e IP (ASTM 2487, 2017). Logo o solo em estudo, pode ser classificado como uma argila de baixa plasticidade (CL) ou um solo orgânico de baixa plasticidade (OL). Entretanto, pela proximidade com o outro grupo, ele também ser classificado como ML (silte de baixa plasticidade), conseqüentemente, olhando para a curva granulométrica o solo apresenta uma maior porcentagem de silte do que de argila.



**Tabela 4: Características do solo natural**

Ensaio	Resultados
Umidade ótima, W	14,30 %
Peso específico aparente seco, $\gamma_d$	18,43 (kN/m <sup>3</sup> )
Limite de Liquidez, LL	28,00 %
Limite de Plasticidade, LP	20,00 %
Índice de Plasticidade, IP	8,00 %
Peso Específico Real dos Grãos, $\gamma_s$	26,80 (kN/m <sup>3</sup> )

Fonte: Autora (2023)



Outro sistema de classificação de solos bastante utilizado é *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 (Tabela 5). Com os valores de limites obtidos, pode-se calcular o índice de grupo (IG) através da Equação 9.

$$IG = 0,2 a + 0,005 ac + 0,01 bd$$

Equação 9

em que:

a = porcentagem do material que passa na peneira nº 200, menos 35. Entretanto, se a porcentagem obtida nesta diferença for maior que 75, adota-se 75; se for menor que 35, adota-se 35 ( $0 \leq a \leq 40$ ).

b = porcentagem do material que passa na peneira nº 200, menos 15. Se a porcentagem obtida nesta diferença for maior que 55, adota-se 55; se for menor que 15, adota-se 15. ( $0 \leq b \leq 40$ ).

c = Valor do Limite de Liquidez (LL) menos 40 (LL- 40). Se o LL for maior que 60, adota-se 60; se for menor que 40, adota-se 40 ( $0 \leq c \leq 20$ ).

d = Valor de Índice de Plasticidade (IP) menos 10 (IP – 10). Se o IP for maior que 30, adota-se 30; se for menor que 10, adota-se 10 ( $0 \leq d \leq 20$ ).

**Tabela 5:** Classificação dos solos (Transportation Research Board)

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira N° 200							MATERIAIS SILTO- ARGILOSOS				
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7	
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A-1-A	A-1-B		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Granulometria -% passando na peneira												
N° 10	50máx											
N° 40	30máx	50máx	51mim									
N°200	15máx	20máx	10máx	35máx	35máx	35máx	35máx	36min	36min	36min	36min	
Características da fração passando na peneira N° 40												
Limite de Liquidez				40máx	41min	40máx	41min	40máx	41min	40máx	41min	
Índice de Plasticidade	6 máx	6 máx	NP	10máx	10máx	11min	11min	10máx	10máx	11min	11min*	
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx	4 máx	8 máx	12máx	16máx	20máx	
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosas ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos		

\* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

**Fonte:** Adaptado de DNIT (2006)

O solo analisado nesta pesquisa 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.

Com todos os dados que foram obtidos através dos experimentos, foi realizado um levantamento quanto à suscetibilidade à expansão, para isso, utilizou-se os métodos indiretos qualitativos, todos os critérios aqui apresentados constam na dissertação de Silva (2018), através destes critérios se pode ver que o solo apresenta baixo grau de expansão (Tabela 6), valendo ressaltar que o solo em estudo é o solo da camada superficial.

**Tabela 6:** Critério de classificação quanto à expansão do solo em estudo (métodos indiretos qualitativos)

<b>Critério de classificação ou susceptibilidade</b>	<b>Parâmetros relacionados</b>	<b>Grau de expansão</b>	<b>Grau de expansão (SILVA, 2018)</b>
<b>Skempton (1953)</b>	IP x fração fina de argila	Inativo	Inativo
<b>USBR – Holtz (1953)</b>	Índice de Plasticidade (IP)	Baixo	Muito alta/Média
<b>Holtz Gibbs (1956)</b>	Índice de Plasticidade (IP)	Baixo	Alto
<b>Seed et al. (1962)</b>	la x fração fina de argila (< 0,002 mm)	Baixo	Alto
<b>Daksanamurthy e Raman (1973)</b>	Limite de Liquidez (LL)	Baixo	Médio
<b>Chen (1975)</b>	LL e IP	Baixo	Alto/médio
<b>Cuellar (1978)</b>	Índice de Plasticidade (IP)	Baixo	Médio
<b>Williams e Donaldson (1980)</b>	IP x fração fina de argila	Baixo	Alto
<b>WES (1983)</b>	LL e IP	Baixo	Alto/médio

**Fonte:** Autora (2023)

Na Tabela 7 estão expostos os dados da espectrometria de raios-X (FRX) do solo, com ele pode avaliar com 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%).

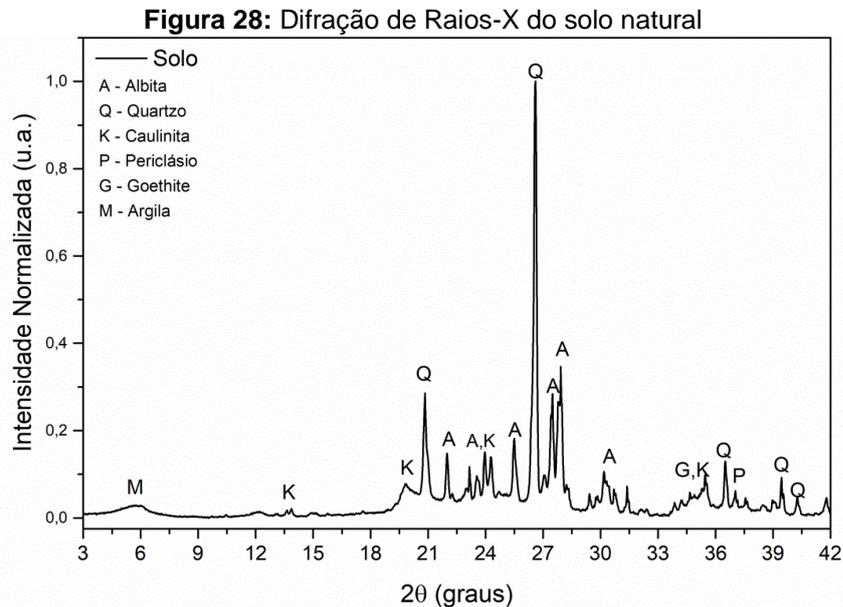
**Tabela 7:** Dados do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X do solo

<b>Componente químico</b>	<b>Teor (%)</b>	<b>Componente químico</b>	<b>Teor (%)</b>
<b>Na2O</b>	ND	<b>CaO</b>	2,46
<b>MgO</b>	1,05	<b>TiO2</b>	0,90
<b>Al2O3</b>	17,56	<b>Fe2O3</b>	5,30
<b>SiO2</b>	60,17	<b>SrO</b>	0,08
<b>P2O5</b>	ND	<b>P.F.</b>	4,60
<b>SO3</b>	0,09	<b>Teor de Umidade</b>	3,70
<b>CL</b>	0,02	<b>TOTAL</b>	100
<b>K2O</b>	4,07		

ND\*- não detectado  
P.F- Perda ao fogo

**Fonte:** Autora (2023)

Na Figura 28, foram plotados os resultados do ensaio de DRX para o solo natural, onde se pode constatar a presença de 6 minerais entre eles albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), periclásio ( $\text{MgO}$ ), goethite ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) e argila, estando em de acordo com o ensaio de FRX. No pico de maior intensidade ( $26^\circ$ ) 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, gnaises metamórficos e xistos, e arenitos (LIRA; NEVES, 2013).

O quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) 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

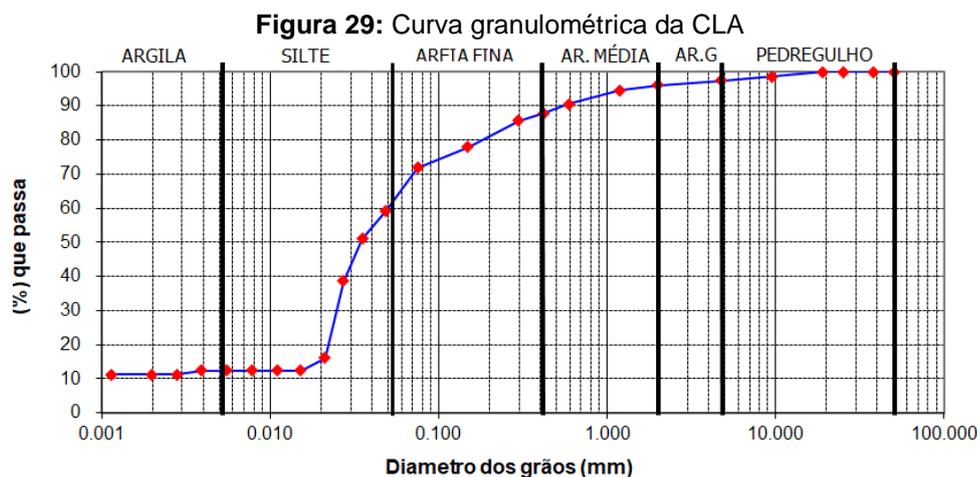
hidratação nas camadas. Esses minerais presentes na caulinita possuem baixa capacidade de troca catiônica, entretanto maior capacidade de troca aniônica devido aos íons presentes fora das lâminas estruturais (BARBOSA, 2013; PEREIRA, 2004), isso comprova a baixa expansividade do solo. A porcentagem de peroclásio 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  $\text{FeO}(\text{OH})$  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).

#### 4.2 Cinza da lenha de algaroba (CLA)

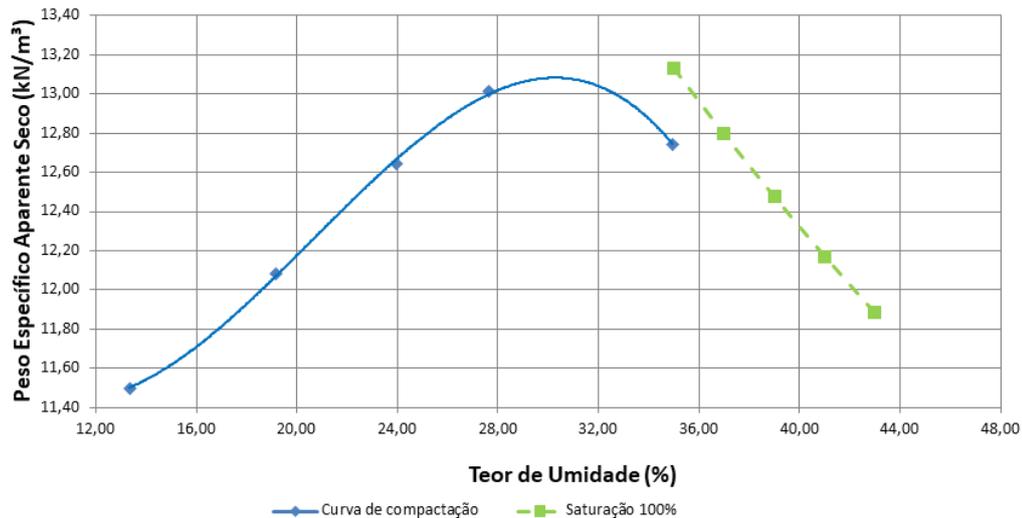
Na amostra de CLA foram realizados os mesmos ensaios de caracterização dos solos. Foi utilizada a cinza sem nenhum beneficiamento. Na Figura 29 é apresentada a curva granulométrica da CLA com o uso de defloculante no ensaio de sedimentação, onde apresentou 72,37% de finos, dividido em 61,27% de silte e 11,10% de argila.

Ao realizar os ensaios de limites de liquidez e de plasticidade, a CLA apresentou-se como material de comportamento não plástico. O peso específico dos grãos foi de  $24,30 \text{ kN/m}^3$ , de acordo com o valor obtido por Pires (2016). Através do ensaio de compactação (Figura 30) obteve-se a peso específico aparente seco  $13,10 \text{ kN/m}^3$  e teor de umidade ótima de 30,31%.



Fonte: Autora (2023)

**Figura 30:** Curva compactação - CLA



Fonte: Autora (2023)

Na Tabela 8 tem-se a composição da CLA na sua forma pura. 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<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, fato que não foi observado, possuindo apenas 0,56% de SiO<sub>2</sub>, 0,30% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ou seja, valores muito abaixo do que a norma estabelece.

**Tabela 8:** Dados do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X da CLA

Componente químico	Teor (%)	Componente químico	Teor (%)
Na <sub>2</sub> O	ND	CaO	57,17
MgO	1,25	TiO <sub>2</sub>	ND
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,30	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ND
SiO <sub>2</sub>	0,56	SrO	0,87
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,14	P.F.	28,22
SO <sub>3</sub>	0,56	Umidade	1,10
CL	0,63	TOTAL	100
K <sub>2</sub> O	7,22		

ND\*- não detectado

P.F.- Perda ao fogo

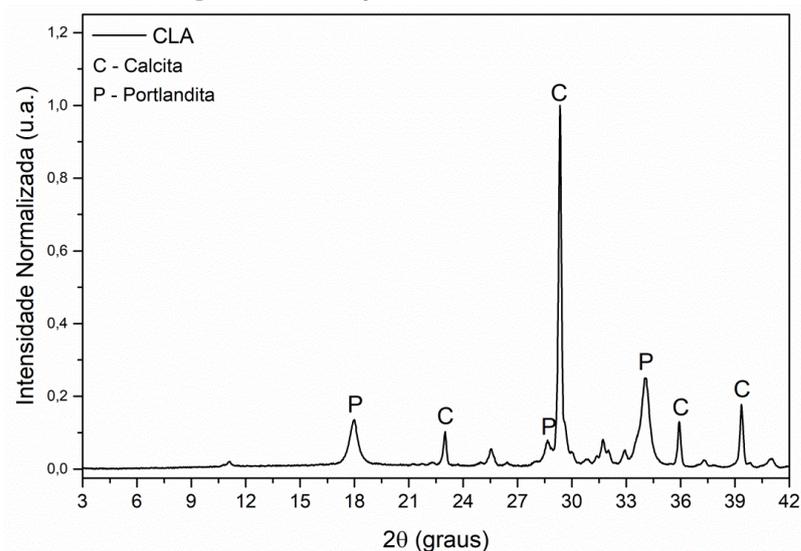
Fonte: Autora (2023)

Na Figura 31, são apresentados os resultados do ensaio de DRX para a CLA, constatando a presença de dois minerais bem definidos: a calcita (carbonato de cálcio – CaCO<sub>3</sub>) e portlandita (hidróxido de cálcio – Ca(OH)<sub>2</sub>), 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 ( $29^\circ$ ) 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).

**Figura 31:** Difração de Raios-X da CLA



Fonte: Autora (2023)

Observando os resultados obtidos da CLA, ela apresenta indicativos de que pode ser misturada com o solo a fim de estabilização de solo a partir do contido grão a grão (CAVALCANTI, 2016).

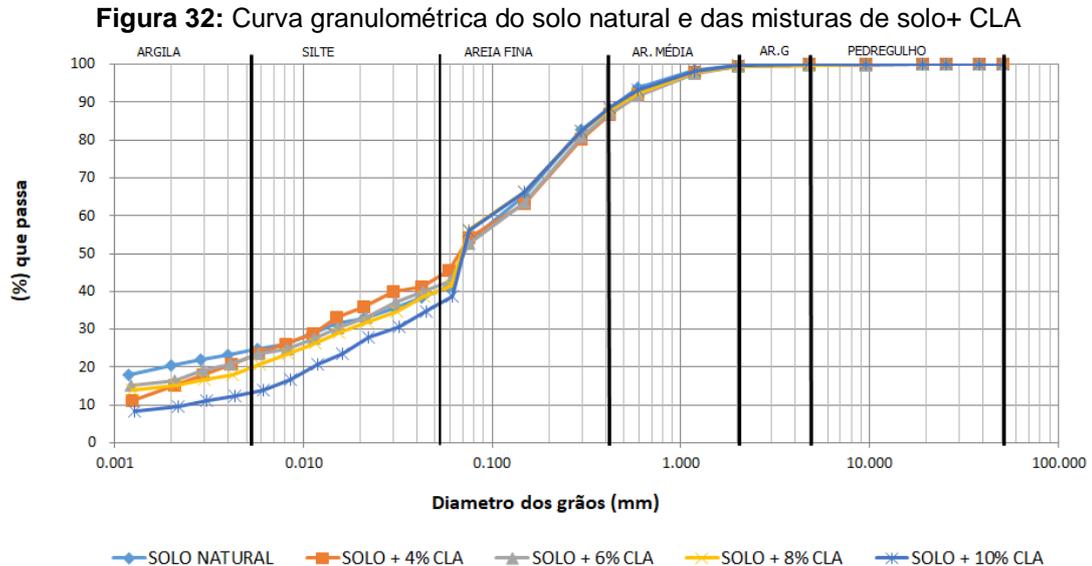
### 4.3 Misturas do solo - CLA

Para obter os resultados da caracterização física das misturas com CLA foram realizados os ensaios de granulometria (peneiramento e sedimentação), densidade real dos grãos, compactação e limites de Atterberg.

#### 4.3.1 Granulometria das misturas

Na Figura 32 têm-se as curvas granulométricas do solo natural e também, das misturas do solo com diferentes percentuais da CLA. É possível constatar, que as curvas conservaram 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.



Fonte: Autora (2023)

Na Tabela 9 apresentam-se os percentuais da caracterização granulométrica do solo natural e as misturas, onde é possível observar uma redução no percentual de argila e um aumento no percentual de silte.

**Tabela 9:** Caracterização física do solo e das misturas solo-CLA

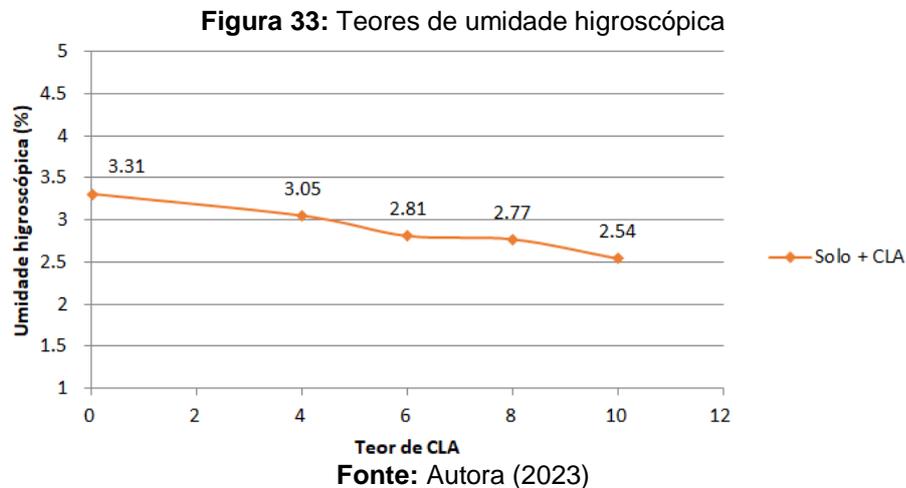
Caracterização física	solo puro	solo + 4%	solo +6%	solo + 8%	solo + 10%
Pedregulho (%)	0.03	0.02	0.32	0.15	0.03
Areia grossa (%)	0.21	0.48	0.36	0.36	0.34
Areia média (%)	11.32	12.65	12.27	11.58	11.07
Areia fina (%)	35.10	32.61	34.45	31.56	32.50
silte + argila (%)	53.34	54.24	52.59	56.34	56.06
Argila (%)	23.31	20.65	20.62	17.98	12.48
Silte (%)	30.03	33.59	31.97	38.36	43.58

Fonte: Autora (2023)

#### 4.3.2 Teor de umidade das misturas

Na Figura 33 estão apresentados os teores de umidade higroscópica. Constatou-se que houve uma redução da umidade 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.



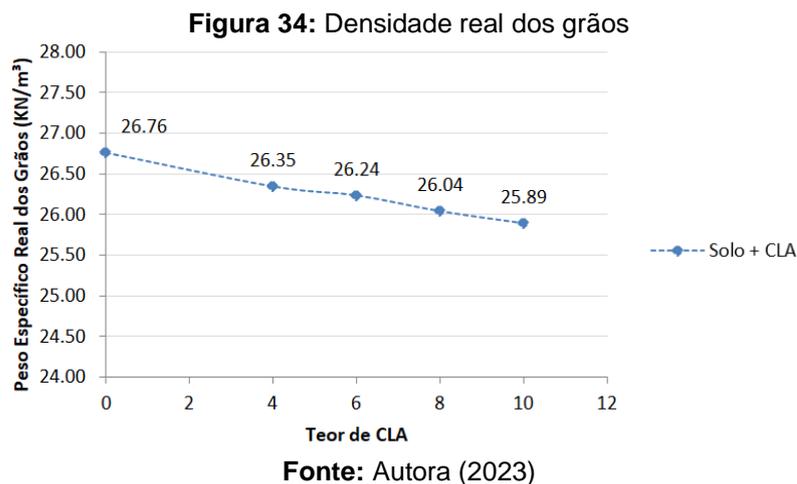
#### 4.3.3 Densidade real dos grãos

Na Tabela 10 têm-se os resultados dos ensaios de peso específico real dos grãos ( $\gamma$ ) e na Figura 34 a densidade real dos grãos, do solo natural e das misturas com CLA, onde o apresentou entre si uma variação média de 0.82%. A mistura do solo com 10% de CLA obteve uma redução de 3.25% em sua densidade, quando comparada ao solo natural.

**Tabela 10: Peso específico real dos grãos das misturas com CLA**

$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	CLA	SOLO PURO	SOLO + 4% CLA	SOLO + 6% CLA	SOLO + 8% CLA	SOLO + 10% CLA
		26.76	26.35	26.24	26.04	25.89

Fonte: Autora (2023)

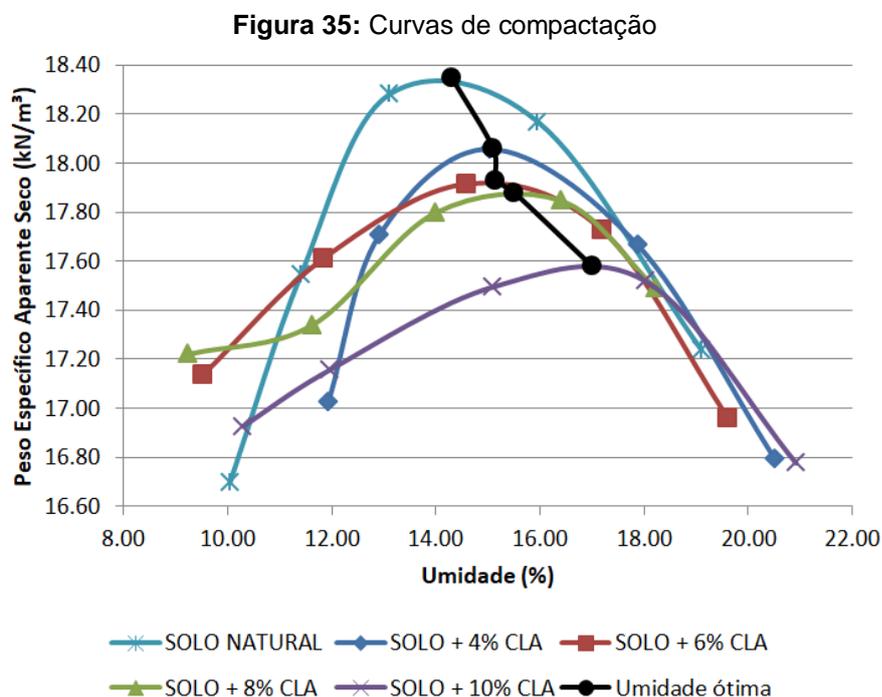


Com a substituição de uma parcela de solo, que é um material mais denso, por uma porcentagem de cinza de lenha de algaroba, material menos denso, ocorre uma mudança no volume da mistura quando comparado ao solo natural. A vista disso, já se era previsto que ocorresse esta redução progressiva nos valores de densidade.

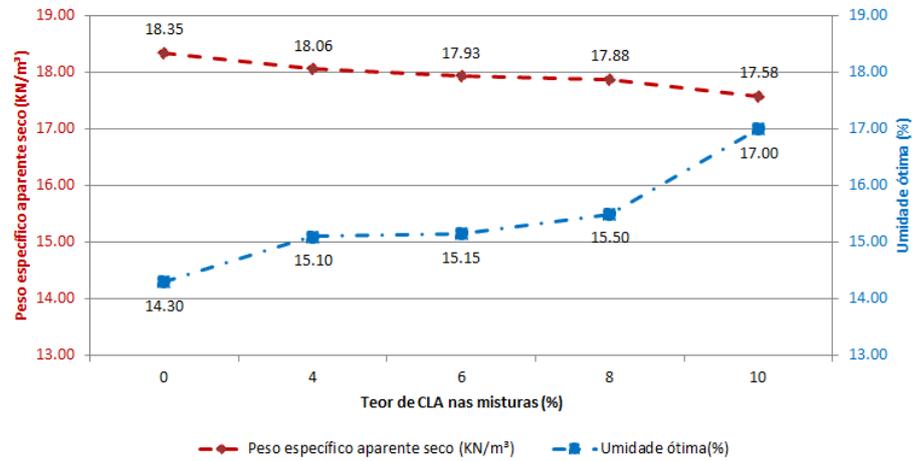
#### 4.3.4 Compactação

Na Figura 35 têm-se as curvas de compactação do solo natural e das misturas do solo + CLA, bem como a linha de tendência da umidade ótima. Pode-se observar, que 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, constando-se que houve um aumento de 21,43% na umidade ótima da mistura do solo + 10% CLA em comparação com o solo natural.

Na Figura 36 é mostrada uma representação simplificada do comportamento dos dados obtidos através das curvas de compactação. Observa-se a diminuição da massa específica seca e aumento da umidade ótima. Na Tabela 11 encontram-se os valores de massa específica aparente seca e a umidade ótima obtidas das curvas de compactação do solo natural e das misturas de solo com CLA.



**Figura 36:** Influência do teor de CLA no peso específico aparente seco e no teor das umidades ótimas nas mistura de solo+CLA.



Fonte: Autora (2023)

**Tabela 11:** Massa específica aparente seca e umidade ótima do solo e das misturas com CLA.

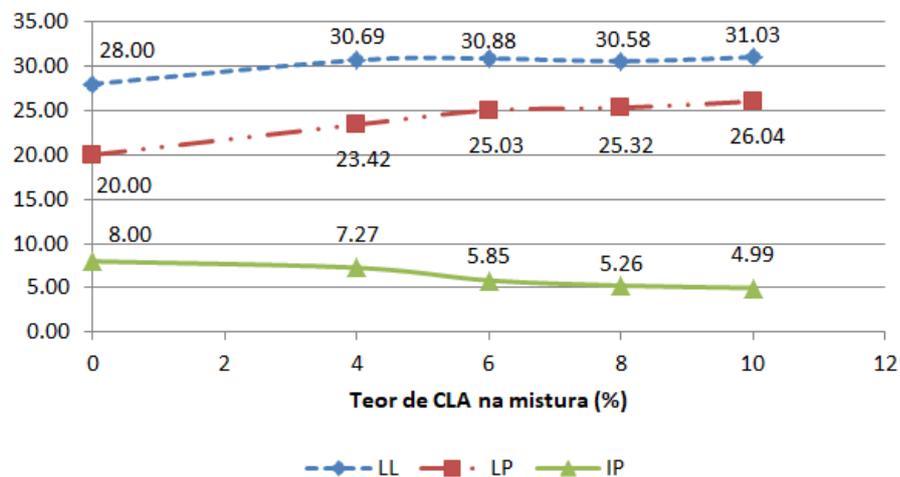
$\gamma_d$ e $h_{ótima}$	0%	4%	6%	8%	10%
Peso específico aparente seco (KN/m³)	18,35	18,06	17,93	17,88	17,58
Umidade ótima (%)	14,30	15,10	15,15	15,50	17,00

Fonte: Autora (2023)

#### 4.3.5 Limites de Atterberg

A adição de cinza ocasionou um aumento no LP e certa estabilidade nos LL, consequentemente havendo uma redução nos IP, constatando-se uma redução de 37,63% do solo com 10% de CLA para o solo natural (Figura 37).

**Figura 37:** Limites de Atterberg do solo e das misturas com CLA.



Fonte: Autora (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 limite de plasticidade e redução nos limites de liquidez e índice de plasticidade, da mesma forma que houve com o acréscimo de CLA ao solo.

Yadu, Tripathi e Singh (2011) observaram uma redução dos índices de plasticidade, densidade real dos grãos, aumento da umidade ótima e redução da massa específica máxima seca, com o acréscimo de cinza de casca de arroz (CCA) e cinzas volantes ao solo. Resultados concordantes encontra-se nos trabalhos de 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 limite de plasticidade, redução do limite de liquidez e conseqüentemente do índice de plasticidade, 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, que podemos notar com o aumento dos valores de limites de plasticidade, pois para que o material tornasse plástico necessitou de um maior teor de água, fazendo com os valores de limite de plasticidade se aproximasse do de limite de liquidez, conseqüentemente, diminuindo o índice de plasticidade, tornando as misturas menos plásticas.

#### **4.3.6 Espectrometria de fluorescência de raios-x (FRX) para solo e misturas**

Na Tabela 12 têm-se os valores do ensaio de FRX para o solo e as misturas de solo com a cinza de lenha de algaroba. Com a adição da CLA ao solo, ocasionou redução de alguns óxidos como no silício que a redução foi em torno de 16%, alumínio foi de mais ou menos 14% e ferro apresentou uma redução de aproximadamente 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.

**Tabela 12:** Dados do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X do solo e as misturas de solo-CLA

COMPONENTE QUÍMICO	TEOR (%)					
	CLA	SOLO	SOLO + 4%	SOLO + 6%	SOLO + 8%	SOLO + 10%
Na <sub>2</sub> O	ND	ND	0,82	0,98	0,86	0,81
MgO	1,25	1,05	1,42	1,37	1,42	1,47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,30	17,56	17,41	16,03	15,52	15,07
SiO <sub>2</sub>	0,56	60,17	59,17	54,87	52,82	50,47
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,14	ND	0,10	0,50	0,69	0,76
SO <sub>3</sub>	0,56	0,09	0,10	0,16	0,19	0,23
CL	0,63	0,02	0,02	0,10	0,12	0,16
K <sub>2</sub> O	7,22	4,07	3,77	4,14	4,09	3,98
CaO	57,17	2,46	2,27	7,40	8,50	10,79
TiO <sub>2</sub>	ND	0,90	0,90	ND	0,89	1,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ND	5,30	4,75	4,86	4,81	4,70
SrO	0,87	0,08	0,07	0,12	0,14	0,17
P.F.	28,22	4,60	5,59	5,88	6,47	6,89
Umidade	1,10	3,70	3,60	3,59	3,48	3,49
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

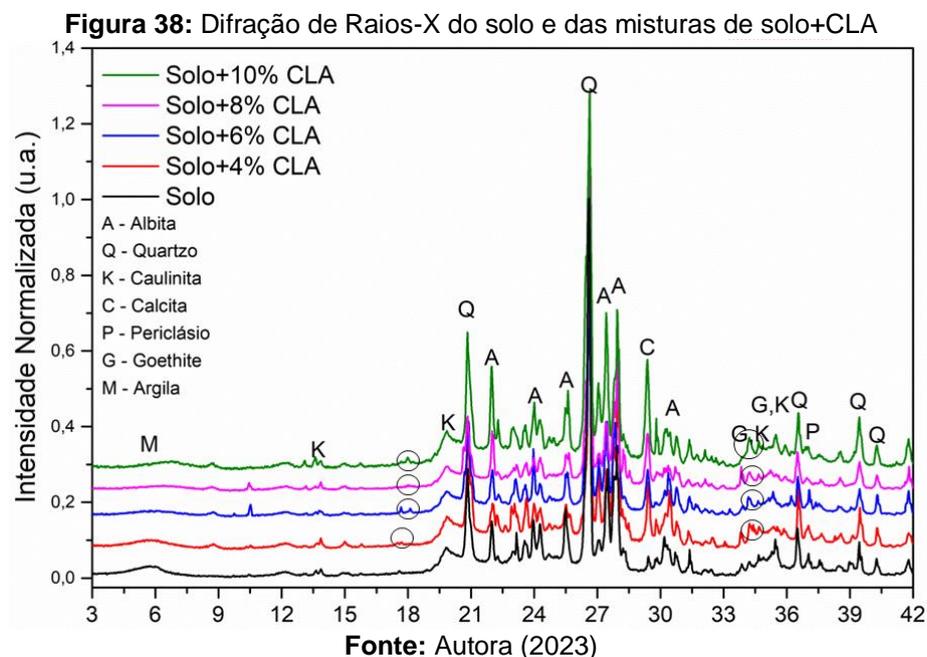
ND\*- não detectado

P.F.- perda ao fogo

Fonte: Autora (2023)

#### 4.3.7 Difração de Raios-x (DRX) para solo e misturas

Na Figura 38 pode-se observar o ensaio de DRX para o solo e as misturas de solo com a CLA.



Constata-se que nas misturas aparecem os mesmos minerais do solo e mais a calcita (carbonato de cálcio) proveniente da cinza da lenha de algaroba (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°(circulados na Figura 39) e outra causa se deve pela cristalinidade predominante do quartzo, que tem pico de maior intensidade aproximadamente em 26°, contatado também por Leloup (2013).

#### 4.4 Ensaio de resistência à compressão simples (RCS)

Neste tópico são apresentados os resultados e a análise da influência do teor da CLA e o tempo de cura na resistência à compressão simples, assim como a influência da relação água/CLA.

##### 4.4.1 Influência do teor da CLA e o tempo de cura na RCS

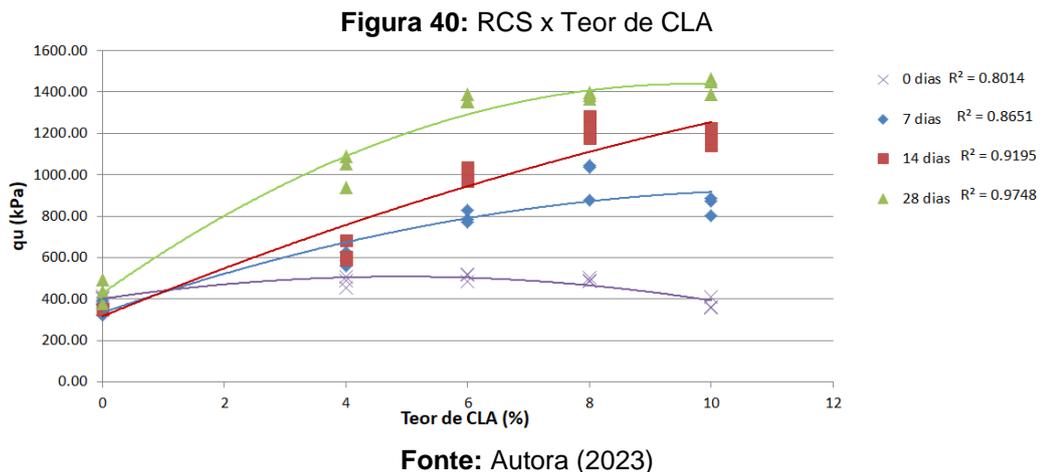
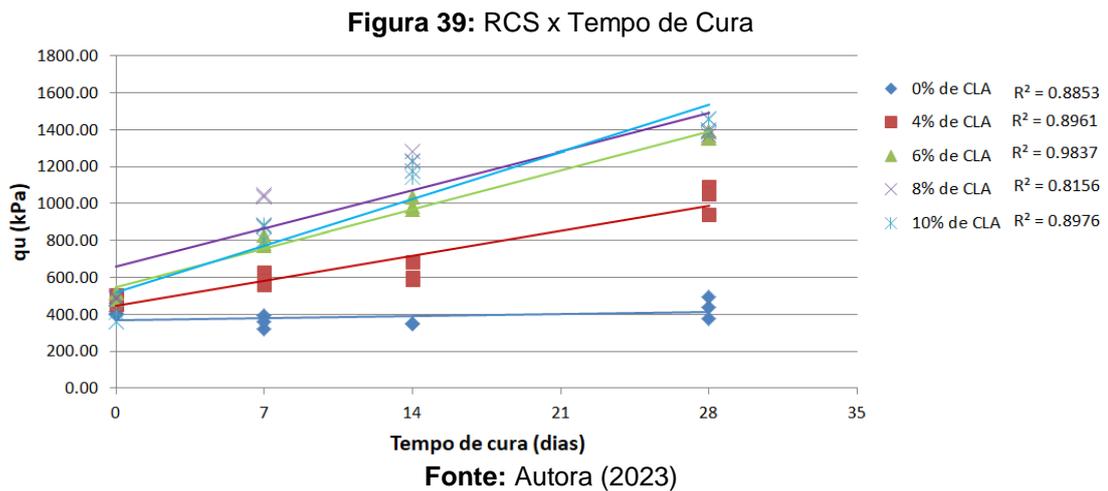
Na Tabela 13 são expostos os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para três corpos de prova e suas médias, em seus diferentes tempos de cura, para o solo natural e as misturas de solo com CLA.

**Tabela 13:** Resultados do ensaio de resistência à compressão simples (RCS)

<b>TENSÃO MÁXIMA DE RUPTURA (kPa)</b>									
<b>%</b>	<b>0 DIAS</b>			<b>7 DIAS</b>			<b>14 DIAS</b>		
	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>
<b>0</b>	405,02	401,45	414,18	394,07	320,60	357,33	348,49	349,82	351,16
<b>4</b>	505,22	487,78	452,64	628,22	560,10	585,94	589,00	602,62	685,77
<b>6</b>	483,58	520,37	518,08	785,33	831,17	770,95	984,34	1037,56	970,08
<b>8</b>	484,72	500,77	487,65	1046,48	1035,14	878,92	1176,73	1281,52	1231,86
<b>10</b>	411,77	361,47	358,80	875,35	802,52	887,07	1140,82	1176,98	1223,97
<b>TENSÃO MÁXIMA DE RUPTURA (kPa)</b>					<b>TENSÃO MÉDIA DE RUPTURA (kPa)</b>				
<b>%</b>	<b>28 DIAS</b>			<b>0 DIAS</b>	<b>7 DIAS</b>	<b>14 DIAS</b>	<b>28 DIAS</b>		
	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>						
<b>0</b>	379,17	437,55	495,93	406,88	357,33	349,82	437,55		
<b>4</b>	1091,55	1054,37	940,67	481,88	591,42	625,80	1028,86		
<b>6</b>	1391,52	1351,93	1359,31	507,34	795,82	997,33	1367,59		
<b>8</b>	1369,24	1398,14	1385,41	491,05	986,85	1230,03	1384,27		
<b>10</b>	1463,33	1390,38	1452,77	377,35	854,98	1180,59	1435,49		

Fonte: Autora (2023)

Pode-se observar que, no período de cura de 28 dias, em decorrência do aumento do teor de CLA, ocorreu o aumento da resistência à compressão simples, onde a mistura de solo com 10% CLA, apresentou o melhor resultado, com um aumento de 228% na resistência à compressão. Já para os percentuais de 4%, 6% e 8% de CLA o aumento foi de 135%, 212% e 216%, respectivamente. Nas Figuras 39 e 40, podem-se observar as linhas de tendência para a RCS em função do tempo de cura e em função do teor de CLA, respectivamente.



Conclui-se que em decorrência do aumento do teor de CLA e do tempo de cura, houve um aumento na resistência do solo (Figuras 39 e 40), 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 apresentou-se praticamente constantes com a variação do tempo de cura, e a resistência das misturas com 0 dias de cura, apresentou quase o mesmo comportamento, entretanto, houve uma redução da

resistência do solo com 10% de CLA, isso ocorre devido ao aumento da umidade, conseqüentemente, diminuição da massa por volume, interferindo nos valores de RCS.

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

O acréscimo da CCA influenciou 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). Em Constantino (2018) que analisou um solo utilizando também a CCA, com diferentes tempos de cura, 0, 7 e 28 dias, obteve com a mistura com 4% e 28 dias de cura, uma resistência de 398,79 kPa, apresentou o melhor desempenho para a RCS, com o aumento do teor de CCA houve uma redução considerável na resistência do solo, ela ainda acrescentou que não houve influencia significativa em função do tempo de cura nos ensaios de resistência à compressão simples.

Guedes et al. (2021) 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.

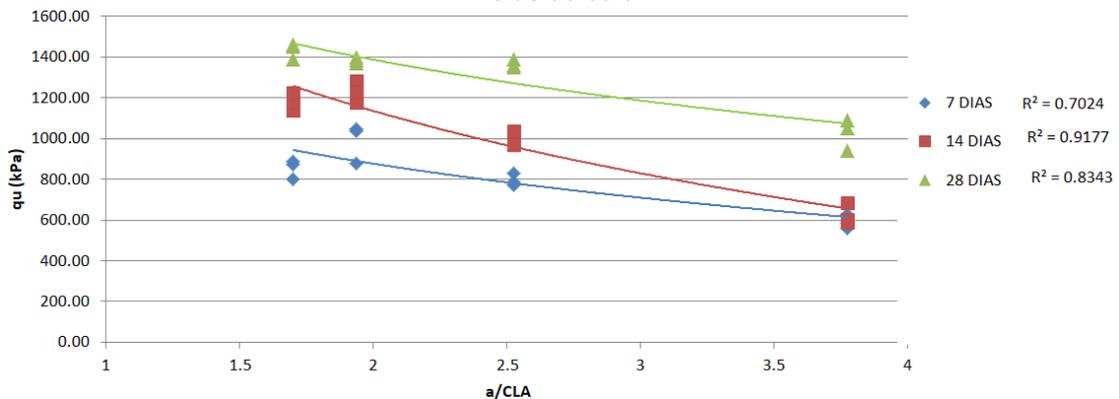
#### **4.4.2 Influência da relação água/CLA na RCS**

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. Já 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, também com o aumento da energia de compactação.

**Figura 41:** Influência da relação água/CLA na resistência à compressão simples ( $q_u$ ) para 7, 14 e 28 dias de cura



Fonte: Autora (2023)

Na Figura 41 é mostrada a influência da relação água/CLA em massa, na resistência à compressão simples ( $q_u$ ) para os tempos de cura de 7, 14 e 28 dias. Foram excluídos da verificação os corpos de prova do solo natural, por não apresentar nenhuma porcentagem de CLA, e os corpos de prova com 0 dias de cura, por apresentarem valores de resistência muito próximos. Observa-se que 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 compressão. Na resistência em referência à relação a/CLA para o teor de 10% comparado com

4% de CLA: houve um acréscimo de 263,56 Kpa, 554 kPa e 406 kPa para 7, 14 e 28 dias de cura.

#### 4.5 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RTCD)

Neste tópico são apresentados os resultados e a análise da influência do teor da CLA e o tempo de cura na resistência à compressão diametral, assim como a influência da relação água/CLA.

##### 4.5.1 Influência do teor da CLA e o tempo de cura na RTCD

Na Tabela 14 têm-se os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral para três corpos de prova e suas médias, em seus diferentes tempos de cura, para o solo natural e as misturas de solo com CLA.

**Tabela 14:** Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RTCD)

TENSÃO MÁXIMA DE RUPTURA (kPa)									
%	0 DIAS			7 DIAS			14 DIAS		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
0	46,41	48,00	47,20	41,35	36,57	38,93	36,51	37,91	46,66
4	42,05	37,53	37,59	53,09	56,47	50,48	66,53	58,47	62,50
6	39,82	40,85	41,87	84,82	74,42	78,27	117,04	90,08	113,60
8	39,57	41,73	36,10	94,89	101,67	119,94	152,34	146,74	155,81
10	31,70	32,75	35,68	99,79	112,27	105,42	138,15	135,44	118,70

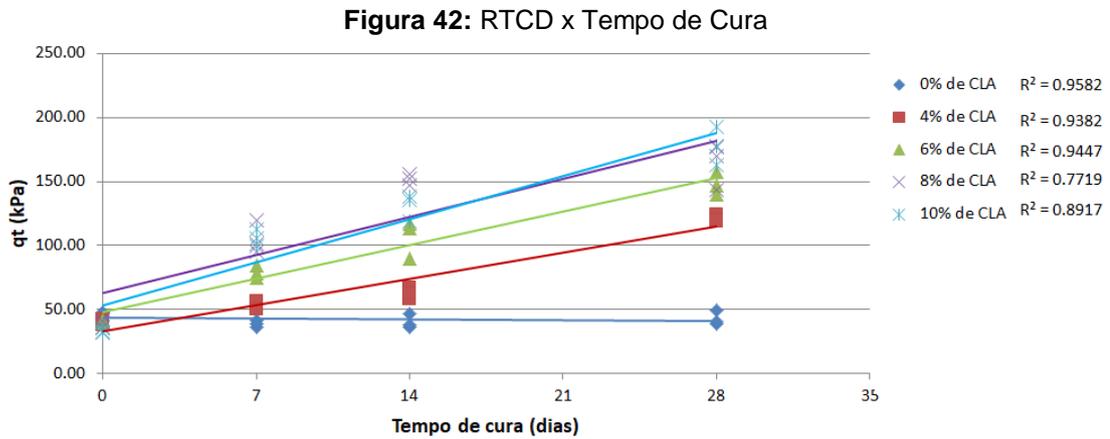
  

TENSÃO MÁXIMA DE RUPTURA (kPa)				TENSÃO MÉDIA DE RUPTURA (kPa)			
%	28 DIAS			0 DIAS	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS
	CP1	CP2	CP3				
0	48,97	38,95	40,36	47,20	38,95	40,36	42,76
4	124,46	119,11	119,53	39,72	53,35	62,50	121,03
6	139,83	157,28	147,06	40,85	79,00	106,91	148,06
8	169,60	143,88	177,30	39,13	105,50	151,63	163,59
10	177,81	162,97	192,64	33,38	105,83	130,76	177,81

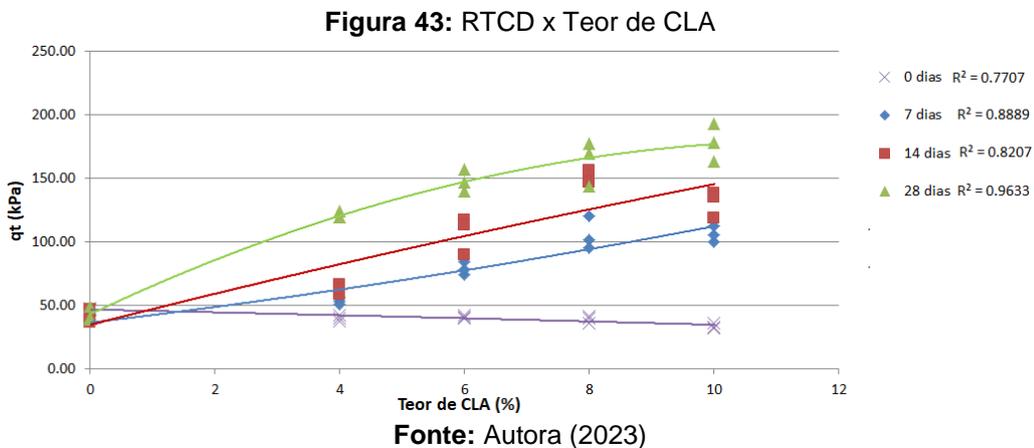
Fonte: Autora (2023)

Pode-se observar 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%. Já para os percentuais de 4%, 6% e 8% de CLA o aumento foi de aproximadamente 183%, 246% e 282%, respectivamente. As linhas de tendência para a resistência à tração por compressão

diametral (RTCD) em função do tempo de cura e em função do teor de CLA são mostradas nas Figuras 42 e 43, respectivamente.



Fonte: Autora (2023)



Fonte: Autora (2023)

Em decorrência do aumento do teor de CLA e do tempo de cura, houve um aumento na resistência à tração no solo (Figuras 43 e 44). 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 uma 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 também foi observado nos ensaios de resistência à compressão simples.

Constantino (2018) averiguou que houve uma 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

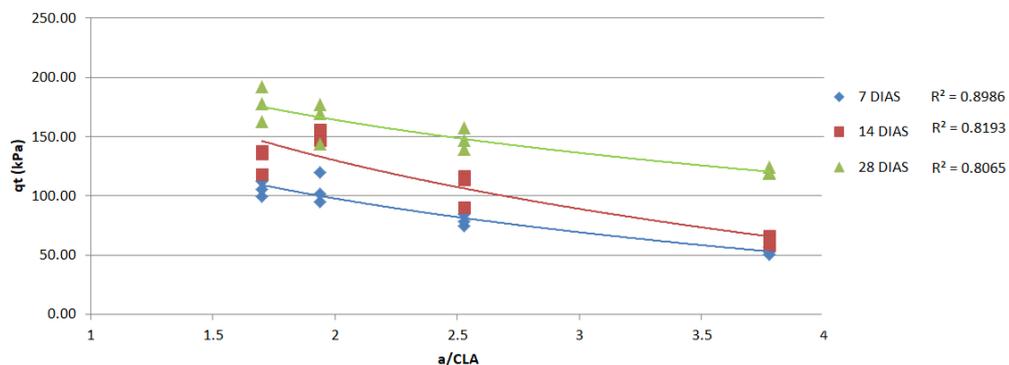
resultado de 24,29 kPa, uma diferença de 37% em comparação ao solo natural. O tempo de cura também não apresenta uma interferência considerável.

O comportamento que do solo com CLA foi 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 43 kPa, 56 kPa, 74 kPa, 101 kPa e 127 kPa, respectivamente. Já com 30 dias de cura a resistência a tração atingiu os valores de 45 kPa, 66 kPa, 84 kPa, 109 kPa e 170 kPa, obtendo um ganho de 377% na resistência do solo com 9% cal quando comparado ao solo natural, isso aos 30 dias de cura.

#### 4.5.2 Influência da relação água/CLA à na RTCD

A influência do fator água/material cimentante, é considerado importante para a determinação da resistência à tração por compressão diametral como também, para as resistências à compressão simples. 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 44.

**Figura 44:** Influência da relação água/CLA na resistência à compressão simples ( $q_t$ ) para 7, 14 e 28 dias de cura



Fonte: Autora (2023)

Foram excluídos da verificação os corpos de prova do solo natural, por não apresentar nenhuma porcentagem de CLA, e os corpos de prova com 0 dias de cura, por apresentarem valores de resistência muito próximos. Como se pode observar, 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 houve um aumento na resistência

à tração por compressão diametral. Na resistência em referência à relação  $a/CLA$  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.

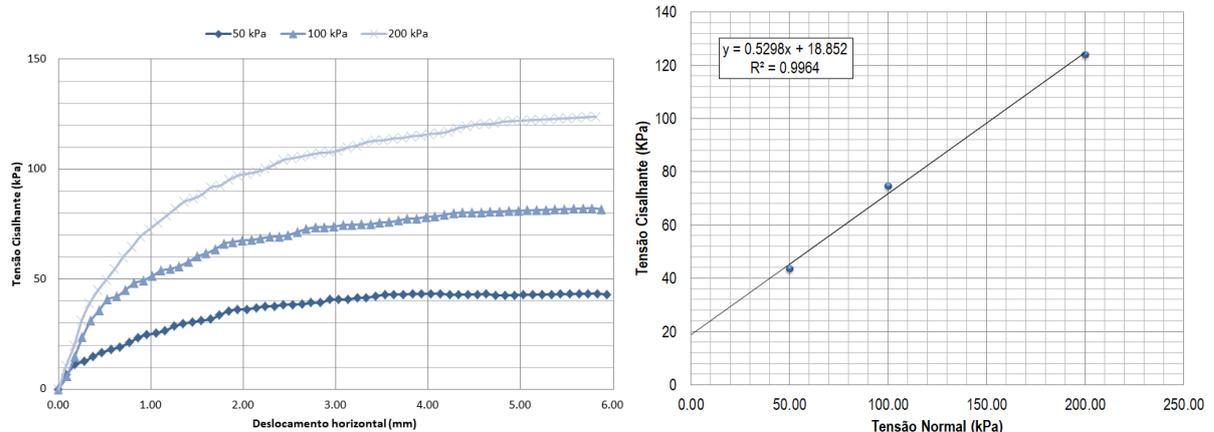
#### 4.6 Ensaios de cisalhamento direto

Para o ensaio de cisalhamento direto foram empregadas 3 tensões normais (50 kPa, 100 kPa e 200 kPa) para traçar a envoltória de Mohr-Coulomb. Feuerharmel (2007) apresenta as possíveis formas de curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal e os critérios de rupturas.

##### 4.6.1 Parâmetros do solo natural

Na Figura 45 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. Na Tabela 15 estão os resultados do ensaio de cisalhamento direto para o solo natural.

**Figura 45:** Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal solo Puro e Envoltórias Mohr–Coulomb para solo natural



Fonte: Autora (2023).

**Tabela 15:** Resultado do ensaio de cisalhamento para o solo natural

Tensão normal (kPa)			Coesão, c (kPa)	Ângulo de Atrito ( $\phi$ °)	$R^2$
50	100	200			
43,51	74,58	123,90	18,85	27,92	0,996

Fonte: Autora (2023)

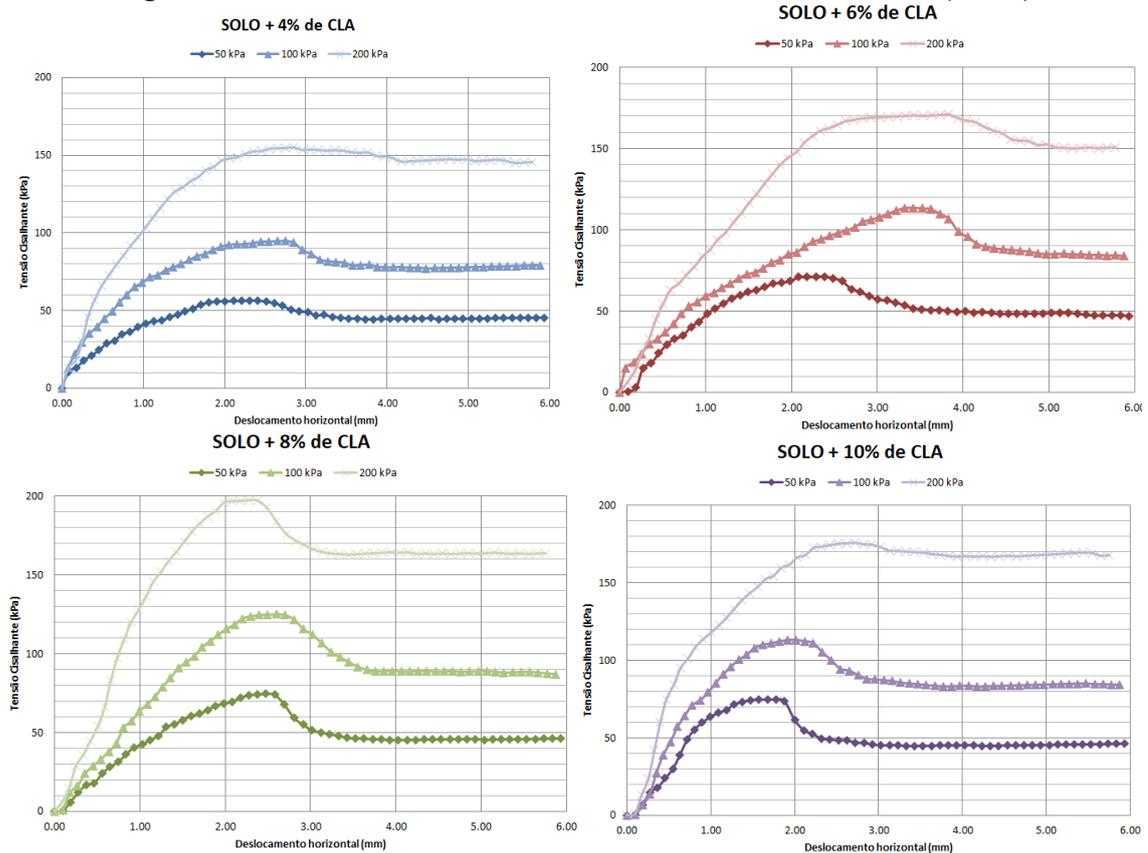
#### 4.6.2 Influência da CLA nas propriedades de cisalhamento direto para as misturas

Nesse tópico expõe a influência dos acréscimos da cinza de lenha de algaroba (CLA) em diferentes percentuais (4, 6, 8 e 10%) no solo, através do ensaio de cisalhamento direto em diferentes tempos de cura (0, 14 e 28 dias).

##### 4.6.2.1 Com 0 dias de cura

Em comparação com o solo natural, observa-se mudança de uma curva do tipo “B”, para uma curva com tipo “A”, ou seja, o gráfico apresenta um pico de resistência ao cisalhamento, no qual a ruptura é definida pela máxima tensão cisalhante (FEUERHARMEL, 2007), quando há a substituição de uma porcentagem do solo por CLA. Nas curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal (Figura 46) pode-se observar um aumento nos picos de resistência ao cisalhamento em decorrência do aumento do percentual de CLA, entretanto, no solo + 10% de CLA, houve uma pequena redução da resistência quando comparado com a mistura de solo + 8% de CLA.

**Figura 46:** Curvas de Tensão Cisalhante X Deslocamento horizontal (0 dias)



Fonte: Autora (2023)

Na Tabela 16 são apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as misturas de solo-CLA com 0 dias de cura. Pode-se ter uma melhor visualização numérica do aumento dos valores de resistência ao cisalhamento obtidas nas misturas de solo com CLA em função das tensões normais aplicadas, além do ângulo de atrito e a coesão, pode-se ver que na tensão normal de 200 kPa, a tensão cisalhante na porcentagem de 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.

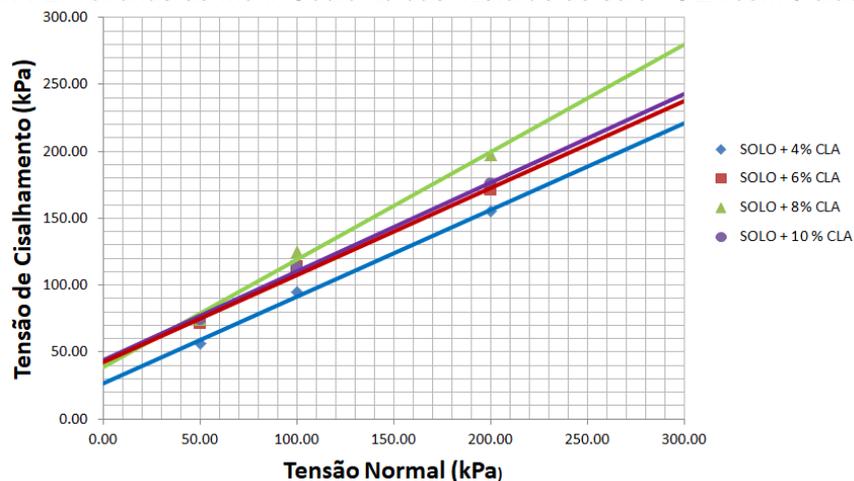
**Tabela 16:** Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as misturas com 0 dias de cura.

Teor de CLA (%)	Tensão normal (kPa)			Coesão, c (kPa)	Ângulo de atrito ( $\phi$ °)	R <sup>2</sup>
	50	100	200			
4	56,43	94,81	154,98	26,35	32,99	0,996
6	71,28	113,61	171,01	42,57	33,11	0,989
8	74,50	125,05	197,38	38,34	38,85	0,992
10	74,83	113,33	175,81	43,59	33,68	0,997

Fonte: Autora (2023)

Os resultados constataam um aumento da coesão em decorrência do aumento do teor de CLA. A coesão passou de 26,35 kPa, com 4% de CLA, para 43,59 kPa, com 10% de CLA, ou seja, um aumento de 165,42%, já o ângulo de atrito permanece praticamente constante onde apresentou uma variação de aproximadamente 6° e na figura 47, se pode observar as envoltórias de Mohr-Coulomb das misturas de solo + CLA com 0 dias de cura.

**Figura 47:** Envoltórias de Mohr-Coulomb das misturas de solo+ CLA com 0 dias de cura.

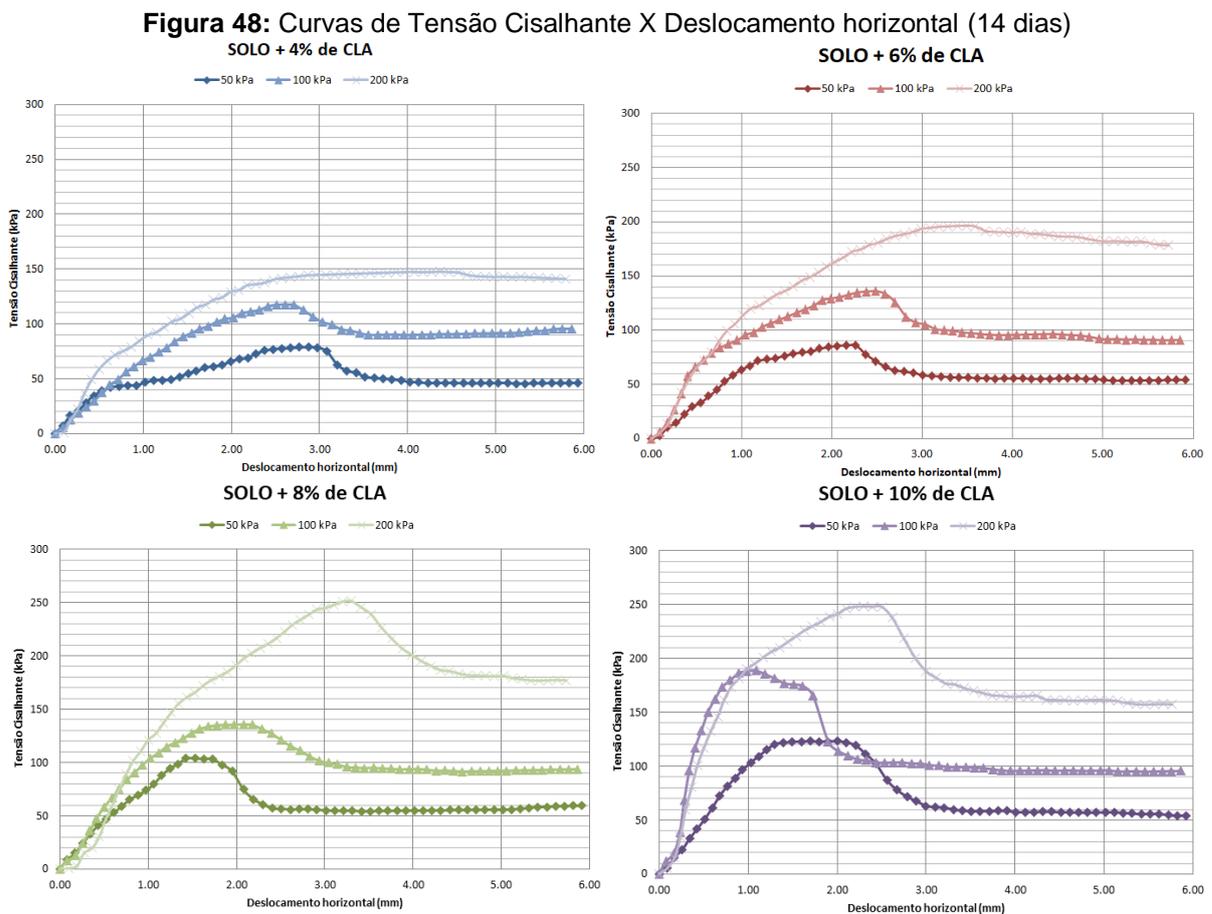


Fonte: Autora (2023)

#### 4.6.2.2 Com 14 dias de cura

Na Figura 48 são apresentadas as curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal com 14 dias de cura para as misturas de solo + CLA, exibindo curva do tipo “A”. Observa-se um aumento nos picos de resistência ao cisalhamento em decorrência do aumento do percentual de CLA.

Na Tabela 17 são apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as misturas de solo-CLA com 14 dias de cura. Verifica-se que na tensão normal de 200 kPa, a tensão cisalhante na porcentagem de 4% de CLA foi de 147,65 kPa, e com 8% de CLA aumentou para 251,31 kPa, um aumento equivalente 170,21%.



Fonte: Autora (2023)

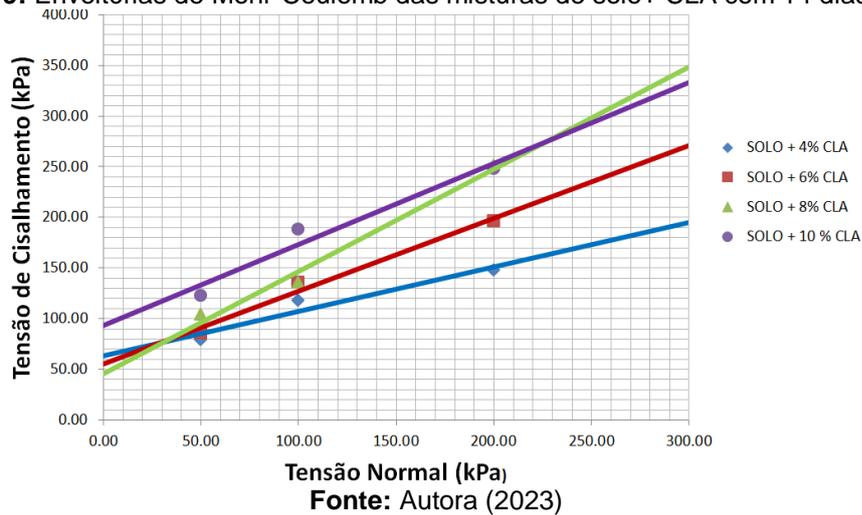
**Tabela 17: Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as misturas com 14 dias de cura.**

Teor de CLA (%)	Tensão normal (kPa)			Coesão, c (kPa)	Ângulo de atrito ( $\phi^\circ$ )	R <sup>2</sup>
	50	100	200			
4	78,77	117,61	147,65	63,75	23,58	0,932
6	85,97	135,97	196,54	55,69	35,69	0,982
8	103,83	135,65	251,31	46,00	45,23	0,984
10	123,15	188,53	248,19	93,32	38,65	0,954

Fonte: Autora (2023)

Os resultados constataam um aumento no ângulo de atrito em decorrência do aumento do teor de CLA, onde passou de 23,58°, com o teor de 4%, para 45,23°, com o teor de 8%. A coesão apresentou uma queda entre os teores de 4%, 6% e 8%, entretanto, com o teor de 10% teve um aumento de 146,38% quando comparado à mistura com 4% de CLA e quando comparado com o teor de 8% o aumento foi em torno de 202%. Pode-se observar as envoltórias de Mohr-Coulomb das misturas de solo+ CLA com 14 dias de cura (Figura 49).

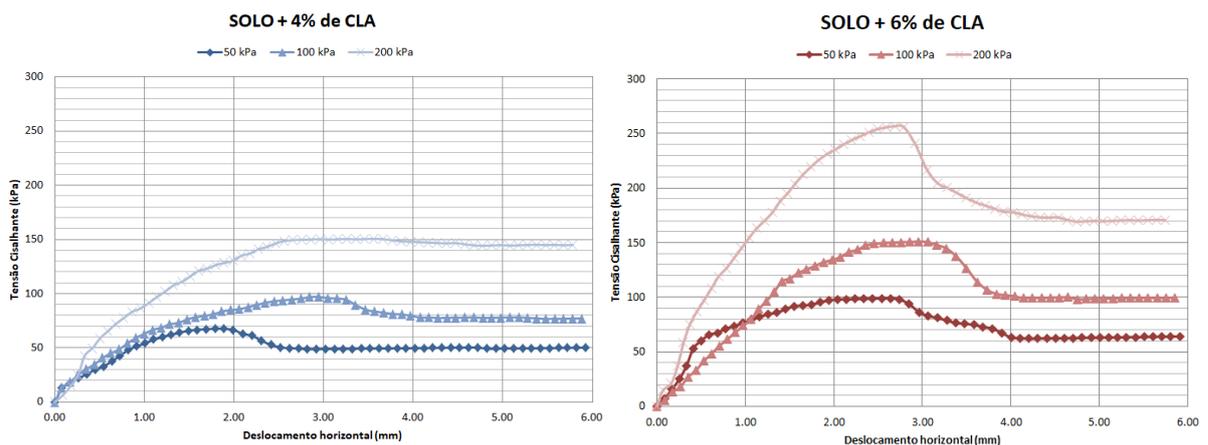
**Figura 49:** Envoltórias de Mohr-Coulomb das misturas de solo+ CLA com 14 dias de cura.

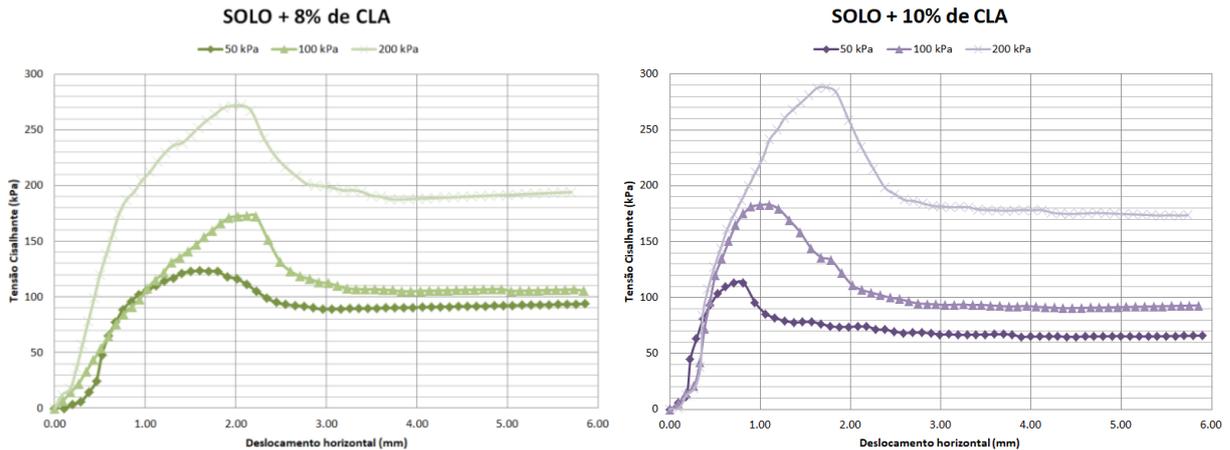


4.6.2.3 Com 28 dias de cura

Na Figura 50 são apresentadas as curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal com 28 dias de cura para as misturas de solo + CLA, exibindo curva do tipo “A”. Observa-se um aumento nos picos de resistência ao cisalhamento em decorrência do aumento do percentual de CLA.

**Figura 50:** Curvas de Tensão Cisalhante X Deslocamento horizontal (28 dias)





Fonte: Autora (2023)

Na Tabela 18 são apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as misturas de solo-CLA com 28 dias de cura. Nota-se 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%.

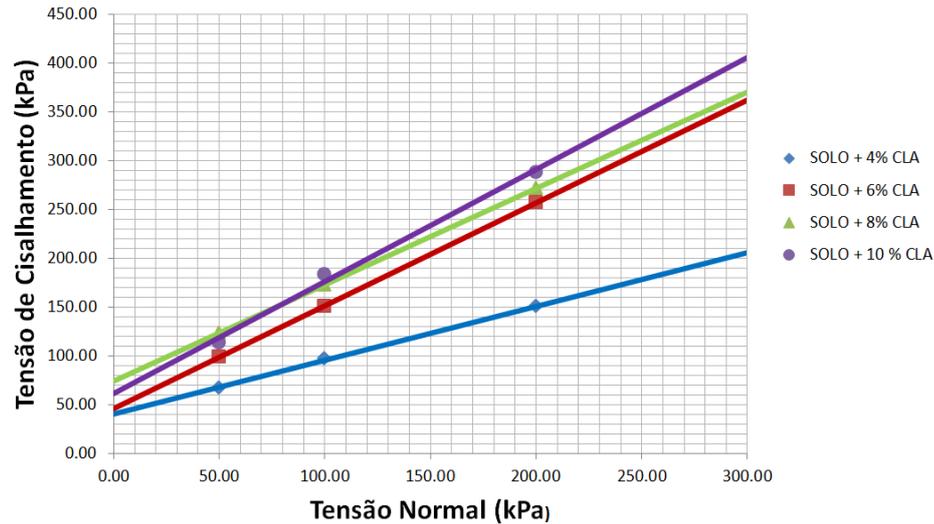
**Tabela 18:** Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as misturas com 28 dias de cura.

Teor de CLA (%)	Tensão normal (kPa)			Coesão, c (kPa)	Ângulo de atrito ( $\phi^\circ$ )	R <sup>2</sup>
	50	100	200			
4	67,60	97,02	150,60	40,81	28,85	0,999
6	99,00	150,89	256,73	46,08	46,47	1
8	123,52	172,76	271,81	74,00	44,68	1
10	113,24	183,10	288,05	60,77	48,96	0,994

Fonte: Autora (2023).

Os resultados exibem um aumento no ângulo de atrito e na coesão em decorrência do aumento do teor de CLA, onde a coesão passou de 40,81 kPa, com o teor de 4%, para 74 kPa, com o teor de 8%, um aumento de 81,33%. Já o ângulo de atrito apresentou 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%. Na Figura 51 observa-se as envoltórias de Mohr-Coulomb das misturas de solo + CLA com 28 dias de cura.

**Figura 51:** Envoltórias de Mohr-Coulomb das misturas de solo+ CLA com 28 dias de cura.

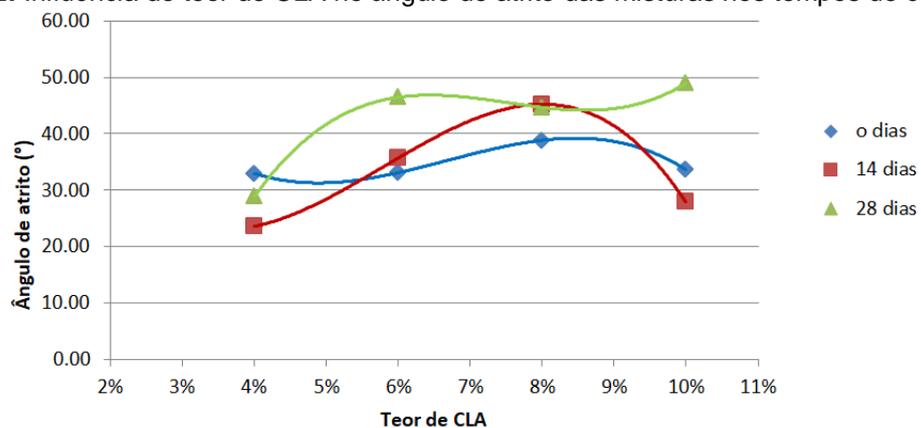


Fonte: Autora (2023)

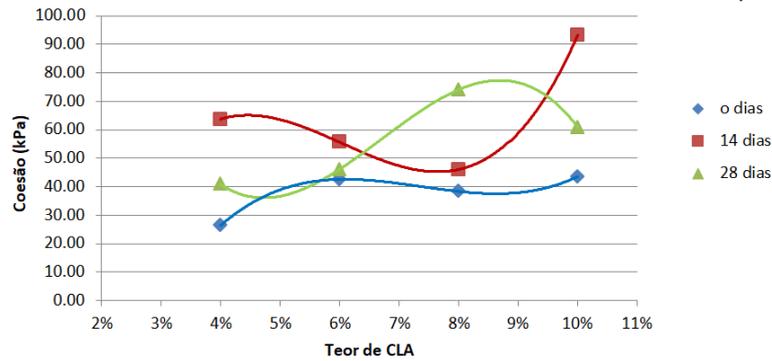
Todas as envoltórias exibem bons ajustes ( $R^2 > 0,93$ ). No geral, a maior parte das misturas de solo com a CLA, exibe uma elevação na coesão do solo em decorrência do aumento do teor de CLA, ressaltando que, não foi observada uma tendência de crescimento. Pode-se observar esse mesmo aumento na coesão 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.

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 52 e 53, respectivamente.

**Figura 52:** Influência do teor de CLA no ângulo de atrito das misturas nos tempos de cura



Fonte: Autora (2023)

**Figura 53:** Influência do teor de CLA na coesão das misturas nos tempos de cura

Fonte: Autora (2023)

Conforme os resultados apresentados, 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.

#### 4.6.3 Influência da CLA nos parâmetros residuais de cisalhamento

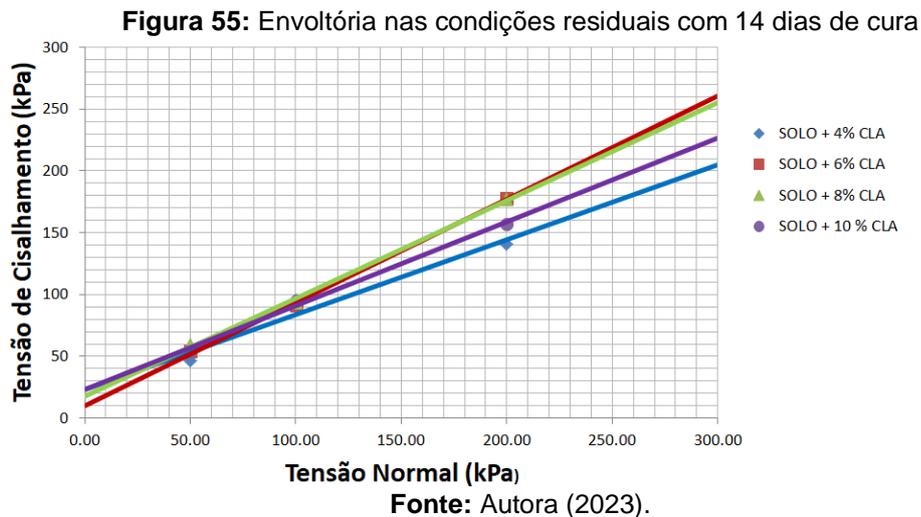
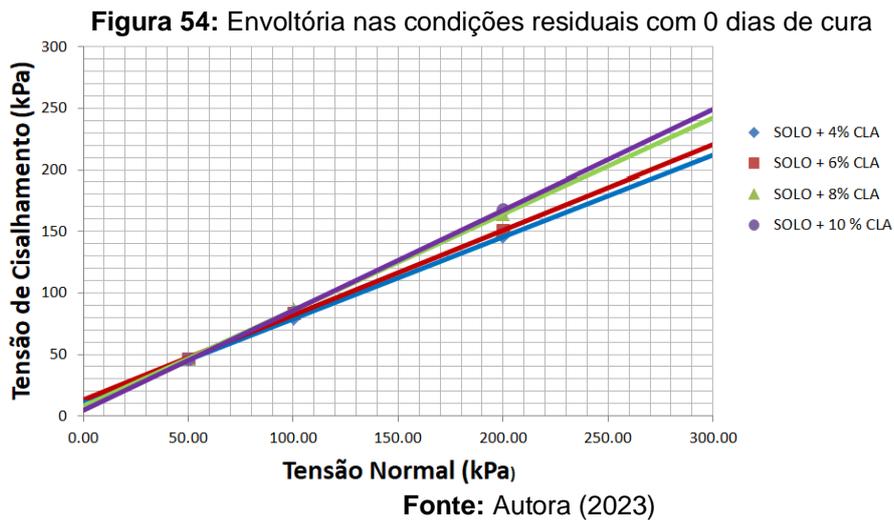
Na Tabela 19 são apresentados os parâmetros de resistência residual, ângulo de atrito residual e coesão residual para os tempos de cura, onde considerou o ponto residual o ultimo ponto da curva. Os valores de coesão nas condições residuais não apresentam tendência definitiva, já o ângulo de atrito aumentou em função do aumento de CLA, podendo notar que os valores de ângulo de atrito permaneceram quase constantes no diferentes tempos de cura, apresentando uma média de  $35,71^\circ$ , ou seja, apresentaram variações de  $31,22^\circ$  a  $39,84^\circ$ .

**Tabela 19:** Resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as misturas em diferentes tempos de cura e teores de CLA (parâmetros residuais)

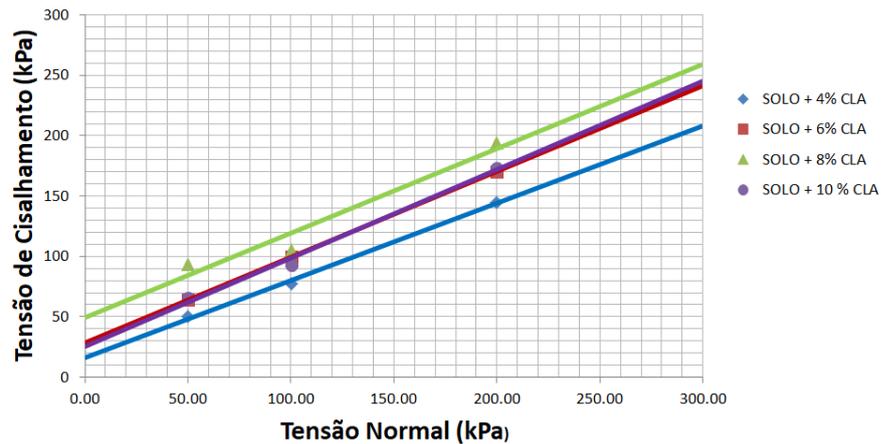
Tempo de cura	Teor de CLA (%)	Tensão normal (kPa)			Coesão, c (kPa)	Ângulo de atrito ( $\phi^\circ$ )	R <sup>2</sup>
		50	100	200			
0 dias	4	45,57	79,18	145,56	12,38	33,67	1
	6	46,89	83,79	150,81	13,38	34,59	0,999
	8	46,23	87,08	163,92	7,81	38,04	1
	10	46,23	84,45	167,85	4,53	39,15	1
14 dias	4	46,23	95,64	140,97	23,57	31,22	0,955
	6	54,15	91,03	178,33	10,50	39,84	0,998
	8	59,42	93,66	177,02	17,74	38,85	0,998
	10	54,15	95,64	157,36	23,29	34,14	0,994
28 dias	4	50,19	77,21	144,91	16,34	32,54	0,997
	6	64,04	99,58	170,47	28,60	35,35	1
	8	93,66	105,50	194,04	49,39	35,00	0,950
	10	66,01	93,00	173,75	25,64	36,17	0,992

Fonte: Autora (2023)

Nas Figuras 54, 55 e 56 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 (Figura 54 e Tabela 20). 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 55).



Em decorrência do aumento da CLA houve 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 (Figura 56).

**Figura 56:** Envolvória nas condições residuais com 28 dias de cura

Fonte: Autora (2023)

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.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A presente pesquisa teve como objetivo de analisar o comportamento mecânico de um solo com a adição de diferentes teores de cinza de lenha de algaroba, em diferentes tempos de cura. Diante dos dados apresentados, foi possível verificar:

- O solo foi classificado como CL (argila de baixa plasticidade) ou ML (silte de baixa plasticidade) e A-4 solo siltoso, de acordo com classificação unificada dos solos (SUSC) e a classificação *Highway Research Board* (HRB) ou *Transportation Research Board* (TRB), respectivamente.
- A CLA apresenta propriedades cimentantes, evidenciada através do ensaio de granulometria e os ensaios de resistência.
- Nas misturas do solo com CLA as granulometrias foram muito similares, devido à leveza da CLA que causou pouca influência. Na densidade real dos grãos houve um comportamento decrescente com o aumento dos percentuais de CLA. Devido sua baixa densidade, quando acrescentada ao solo, há uma diminuição da massa da amostra. No ensaio de compactação, observou-se que com a adição da CLA houve um incremento na umidade ótima e diminuição da densidade seca máxima, provocado pela necessidade de maior absorção de água pela CLA.
- Nos ensaios de resistência à compressão simples (RCS), com 28 dias de cura, verificou-se um aumento da resistência à compressão do solo de 135%, 212%, 216% e 228%, em função do aumento da porcentagem de CLA (4%, 6%, 8% e 10%, respectivamente). Com 10% de CLA, a resistência a compressão do solo alcançou um valor de 1435,49 kPa. A relação água/CLA não se mostrou um critério eficiente para estimar a resistência à compressão simples.
- Nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RTCD), verificou-se comportamento semelhante ao do ensaio de RCS. Com 28 dias de cura, a resistência à tração do solo aumentou 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 alcançou o valor de 177.81 kPa. A relação água/CLA também não se mostrou eficiente para estimar a resistência à tração por compressão diametral.

- Nos ensaios de resistência ao cisalhamento direto obteve-se os parâmetros de coesão e ângulo de atrito nas condições de ruptura e nas condições residuais. Na maioria dos casos, a coesão aumentou em decorrência do tempo de cura e aumento dos teores de CLA, já o ângulo de atrito não apresentou uma tendência definitiva com a variação do tempo de cura e percentual de CLA, onde variou aproximadamente entre 23° a 49°.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Analisar o uso de maiores teor de CLA;
- Realizar os ensaios para energia de compactação intermediária e modificada;
- Examinar o ensaio de DRX com a influência da água nos diferentes tempos de cura;
- Avaliar às resistências e os ensaios de cisalhamento direto em tempos de cura mais prolongados para a mistura de solo-CLA;
- Estudar a influência da porosidade, em função do volume de CLA;
- Realizar o ensaio de cisalhamento triaxial;
- Avaliar a influência da sucção nas misturas;
- Ensaio de microscopia óptica, no solo e nas misturas de solo-CLA, para analisar as ligações entre os grãos e a interferência da cinza nas interações.

## REFERÊNCIAS

ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brail. 2022.

AFLITOS, A. O. **A influência de aditivos químicos em propriedades selecionadas e de engenharia de solos vermelhos tropicais do Norte e Nordeste do Brasil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia., 1981.

AFRAIN, H. A Review on Different Types Soil Stabilization Techniques. **International Journal of Transportation Engineering and Technology**, v. 3, n. 2, p. 19, 2017.

AL-MUKHTAR, M.; KHATTAB, S.; ALCOVER, J. F. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. **Engineering Geology**, v. 139–140, p. 17–27, 2012.

AL-RAWAS, A. A. et al. A comparative evaluation of various additives used in the stabilization of expansive soils. **Geotechnical Testing Journal**, v. 25, n. 2, p. 199–209, 2002.

AL-ATROUSH, M. E. et al. A novel application of the hydrophobic polyurethane foam: Expansive soil stabilization. **Polymers**, v. 13, n. 8, 2021.

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

ALMEIDA, N. G. M. DE. **TÉCNICAS DE MELHORAMENTO DE SOLOS - Parte 1.** **Construlink Press**, v. 19, 2003.

AMORIM, S. F. **Contribuição à cartografia geotécina: 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.

AMU, O. O. et al. Sugarcane Straw Ash Effects on Lime Stabilized Lateritic Soil for Structural Works. **Stavební obzor - Civil Engineering Journal**, v. 29, n. 03, p. 306–314, 2020.

ANDAY, M. Accelerated Curing for Lime-Stabilized Soils. **Highway Research Board Bulletin**, v. 304, n. 2, 1961.

ANDAY, M. C. Curing Lime-Stabilized Soils. **Highway Research Board**, n. 29, p. 13–26, 1963.

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.

AGEITEC. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. **Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Município de Agrestina, PE.** Disponível em: <<http://www.uep.cnps.embrapa.br/solos/pe/Agrestina.pdf>>. Acesso em 16 mar. 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.

ATAIDE, S. O. F. DE. **Análise do Comportamento de Variação de Volume Devido à Inundação de um Solo Expansivo Quando Misturado com Aria.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. Orientador: Silvio Romero de Melo Ferreira, 2017.

ATTOM, M. F.; AL-SHARIF, M. M. Soil stabilization with burned olive waste. **Applied Clay Science**, v. 13, n. 3, p. 219–230, 1997.

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). Orientador: Prof. D.Sc. Ronaldo Luis dos Santos Izzo, 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.

BARSHAD, I. THE EFFECT OF THE INTERLAYER CATIONS ON THE EXPANSION OF THE MICA TYPE OF CRYSTAL LATTICE. **American Mineralogist**, v. 25, n. Table 2, p. 225–238, 1950.

BASMA, A. A.; TUNCER, E. R. Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays. **Transportation and research record**, v. C, n. 1295, p. 52–61, 1991.

BELL, F. . Lime stabilization of clay minerals and soils. **Engineering geology**, v. 42, p. 223–237, 1996.

BELL, F. G. Lime stabilisation of clay soils. **Bulletin of the International Association of engineering geology de l'Association Internationale de GÉOLOGIE DE L'INGENIEUR**, v. 39, n. 2, p. A105, 1989.

BENNY, J. R. et al. Effect of Glass Powder on Engineering Properties of Clayey Soil. **IJERT Journal International Journal of Engineering Research and Technology**, v. 6, n. 05, p. 228–231, 2017.

BEZERRA, A. L. **Análise da expansão de um solo no estado natural e compactado com adição de cinza de casca de arroz no município de Brejo da Madre de Deus-PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. Orientador: Silvio Romero de Melo Ferreira, 2019.

BEZERRA, I. M. DE L. **Análise da interação interpartículas e do processo de fissuração de um solo expansivo tratado com areia, cal e cinza de casca de arros**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. Orientador: Silvio Romero de Melo Ferreira., 2020.

BORDIGNOON, V. R. **Efeitos da Adição da Cal Hidratada na Estabilização de um Solo Sedimentar para Pavimentação Urbana na Região de Curitiba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Tecnológica do Paraná. Orientador: Rogério Francisco Kuster Puppi, 2015.

BRANDL, H. Alteration of Soil Parameters by Stabilization with Lime. **Proceedings of the 10 th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden**, p. 587- 594., 1981.

BRITO, L. C.; PARANHOS, H. DA S. Estabilização de Solos. **Revista Científica Multidisciplinas Núcleo de Conhecimento**, v. 01, p. 425–438, 2017.

BROOKS, R. M. Soil Stabilization With Flyash and Rice Husk Ash. **International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences**, v. 1, n. 3, p. 2076–734, 2009.

BURGOS, P. C. et al. Study on the characteristics and behavior of expansive soils. **VI International Symposium on Innovation and Technology (SIINTEC)**, p. 253–261, 2020.

CARCEDO, F. J. A. et al. **Mapa previsor de riesgos por expansividad de argillas en España a Escala 1:1.000.000**. [s.l.] Série: Geología Ambiental. Instituto Geológico y Minero de España. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 1986.

CARROLL, D. Ion exchange in clays and other minerals. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 70, n. 6, p. 749–779, 1959.

CARROLL, D.; STARKEY, H. C. Reactivity of clay minerals with acids and alkalis. **Clays and Clay Minerals**, v. 19, n. 5, p. 321–333, 1971.

CARVALHO, A. L. DE. **Análise do Efeito da Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.

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

CELIK, E.; NALBANTOGLU, Z. Effects of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) on the swelling properties of lime-stabilized sulfate-bearing soils. **Engineering Geology**, v. 163, p. 20–25, 2013.

CHU, T. Y. et al. **Soil Stabilization With Lime-Flyash Mixtures: Preliminary Studies With Silty and Clayey Soils** Highway Research Board Bulletin, 1955.

ÇOKÇA, E. Use of Class C Fly Ashes for the Stabilization of an Expansive Soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering** 127(7), p. 568–573, 2001.

CONSOLI, N. C. et al. Studies on the Dosage of Fiber-Reinforced Cemented Soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 12, p. 1624–1632, 2011.

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. Orientador: Silvio Romero

de Melo Ferreira, 2018.

CPRH. Diagnóstico ambiental das lavanderias de Toritama-PE. p. 1–11, 2005.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização De Solos Residuais Graníticos Através da Adição de Cal**. [s.l.] Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal., 2001.

CRUZ, M. DE L.; JALALI, S. Melhoria do Desempenho de Misturas de Solo-cimento com Recurso a Activadores de Baixo Custo. **Revista Luso-Brasileira de Geotecnia**, p. 49–69, 2010.

DASH, S. K.; HUSSAIN, M. Lime Stabilization of Soils: Reappraisal. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 6, p. 707–714, 2012.

DAVIDSON, D. .; MATEOS, M.; BARNES, H. . Improvement of lime stabilization of montmorillonitic clay soils with chemical additives. **Highway Research Board Bulletin**, p. 33–55, 1960.

DIAMOND, S.; KINTER, E. B. Mechanisms of Soil-Lime Stabilization An Interpretive Review. **Highway Research Record**, n. 92, p. 83–102, 1965.

DINESH, A.; INDHUMATHI, S.; PICHUMANI, M. **Performance Assessment of Copper Slag and Sawdust Ash in Stabilization of Black Cotton Soil**Lecture Notes in Civil Engineering, 2021.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de pavimentação. **Ipr-719**, 2006.

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. Orientador: José Fernando Thomé Jucá, 2019.

DRUMOND, M. A.; PIRES, I. E.; BRITO, J. O. Algarobeira : Uma alternativa para preservar as Espécies Nativas do Nordeste Semi-Árido. **Silvicultura**, v. 10, p. 51–53, 1984.

EADES, J. L.; NICHOLS JR, F. P.; GRIM, R. E. Formation of new minerals with lime

stabilization as proven by field experiments in virginia. **Highway Research Board Bulletin**, n. 335, p. 31–39, 1963.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA SOLOS, 2006.

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.

FILHO, H. C. S.; SACCO, R. L.; CONSOLI, N. C. The effect of grain size of ground glass particles on the strength of green stabilized sand. **Soils and Rocks**, v. 43, n. 4, p. 669–677, 2020.

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. Orientador: Prof. Dr. André Maurício Brinatti, 2008.

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropólo do baixo Jaguaribe / Estado do Ceará**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará. Orientadora: Suelly Helena de Araújo Barroso, 2008.

GOODARZI, A. R.; AKBARI, H. R.; SALIMI, M. Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume. **Applied Clay Science**, v. 132–133, p. 675–684, 2016.

GUEDES, J. P. C. et al. 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**, ago. 2021.

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. Orientador: Prof. Antônio Eduardo Clark Peres, 2012.

HILT, G. H.; DAVIDSON, D. T. Lime fixation in clayey soils. **Highway Research Board**, n. 262, p. 20–32, 1960.

JAMES, J. et al. Effect of Curing Conditions and Freeze-Thaw Cycles on the Strength of an Expansive Soil Stabilized with a Combination of Lime, Jaggery, and Gallnut Powder. **Advances in Civil Engineering**, v. 2018, 2018.

JAMES, J.; PANDIAN, P. K. Bagasse Ash as an Auxiliary Additive to Lime Stabilization of an Expansive Soil: Strength and Microstructural Investigation. **Advances in Civil Engineering**, v. 2018, 2018.

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.

JEYAPALAN, J. K.; JR., G. T. R.; LYTTON, R. L. **State-of-the-art Review of expansive soil Treatment Methods**Texas A&M University, 1981.

JONES, C. W. Stabilization of expansive clay with hydrated lime and with portland cement. **Highway Research Bulletin 193, Highway Research Board, National Research Council**, n. 2, p. 40–47, 1958.

KAWAHASHI, J. et al. Estabilização de solos siltosos expansivos de São Paulo com ligantes com elevado teor de escória para pavimentação. **Transportes**, v. 18, n. 2, p. 5–16, 2010.

KENNEDY, T. W. et al. Evaluation of Lime and Cement Stabilization. **Transportation Research Record**, p. 11–25, 1987.

KHEMISSA, M.; MAHAMED, A. Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay. **Applied Clay Science**, v. 95, p. 104–110, 2014.

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. Orientador: Silvio Romero de Melo Ferreira., 2019.

LAGUROS, J. G. Lime-Stabilized Soil Properties and the Beam Action Hypothesis. **Highway Research Record**, n. 92, p. 12–20, 1965.

LEE, P. Y.; SUEDKAMP, 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. Orientadora: Ana Cecília Vieira da Nóbrega, 2013.

LIMA, R. P. DE et al. 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 fíler alternativo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pernambuco. Orientadora: Ana Cecília Vieira da Nóbrega, 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.

LIU, J. et al. Effect of Polyvinyl Acetate Stabilization on the Swelling-Shrinkage Properties of Expansive Soil. **International Journal of Polymer Science**, v. 2017, 2017.

LIU, Y. et al. Stabilization of expansive soil using cementing material from rice husk ash and calcium carbide residue. **Construction and Building Materials**, v. 221, p. 1–11, 2019.

LOPES JUNIOR, L. DA S. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimenro e rocha basáltica pulverizada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Orientador: Nilo César Consoli, 2007.

LUNDY, H. L.; GREENFIELD, B. J. Evaluation of deep in-situ soil stabilization by high-pressure lime-slurry injection. **Highway Research Record**, n. 235, 1968.

MAHLER, C. F. **Análise de Obras Assentes em Solos Colapsíveis e Expansivos**.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Orientador: Willy Alvarenga Lacerda, 1994.

MAIA, E. DA S. et al. Estudo de melhoramento de solo com utilização de resíduos de indústria de celulose. **Revista tecnologica Fortaleza**, v.35, n.1 e 2, p. 78–88, 2014.

MALEKZADEH, M.; BILSEL, H. Use of Posidonia Oceanica Ash in Stabilization of Expansive Soils. **Marine Georesources and Geotechnology**, v. 32, n. 2, p. 179–186, 2014.

MARQUES, S. F. V.; CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L. Effects of curing stress on the stiffness of a cement-mixed sand. **E3S Web of Conferences**, v. 92, p. 1–5, 2019.

MARTINATTO, S. **Comportamento de um solo arenoso estabilizado com álcali ativação visando a pavimentação**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Orientado por:Nilo Cesar Consoli, 2021.

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

MATEOS, M. Stabilization of Soils with Fly Ash Alone. **HIGHWAY RESEARCH RECORD**, v. 52, p. 59–65, 1964.

MCCALLISTER, L. D.; PETRY, T. M. **Property changes in lime treatates expansive clays under continuous leaching**Arlington, Texas, 1990.

MCCALLISTER, L. D.; PETRY, T. M. Physical property changes in a lime-treated expansive clay caused by leaching. **Transportation Research Record**, v. 1295, p. 37–44, 1991.

MEDEIROS, A. A. DE L.; SILVA, M. F. DA; FURLAN, A. P. Avaliação comparativa dos métodos de dosagem do pH e de Thompson para a estabilização com cal de dois solos tropicais. **XXXIII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**, 2019.

MEDEIROS, L. D. ., FERREIRA , S. R. de M., & BELLO, M. I. M. da C. V. (2023). Evolução da estabilização química em solos expansivos. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, 8(2), 123–139.

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. Orientadora: Prof. Michéle Dal Toé Casagrande, 2014.

MELO, M. C. S. DE. **Estudo de argamassas adicionadas de cinzas de algaroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. Orientadora: Ana Cecília Vieira da Nóbrega, 2012.

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. Orientador: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves, 2018.

MICHAEL, T.; SINGH, S. K.; KESHARWANI, M. Geotechnical Characteristics of Mango Shell Ash ( Msa ) on Black Cotton Soil As Pavement Material. **International Journal of Innovative Research in Science and Engineering**, v. 2, n. 09, p. 192–199, 2016.

MILLER, G. A.; AZAD, S. Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust. **Construction and Building Materials**, v. 14, n. 2, p. 89–97, 2000.

MITCHELL, J. K.; HOOPER, D. R. Influence of time between mixing and compaction on properties of lime stabilized expansive clay. **HRB Bulletin 304, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 14–31**, p. 14–31, 1961.

MODARRES, A.; NOSOUDY, Y. M. Clay stabilization using coal waste and lime - Technical and environmental impacts. **Applied Clay Science**, v. 116–117, p. 281–288, 2015.

MOHAMMED, Y. F.; FALAH, H. R.; KAWTHER, Y. H., A.-S. Improvement of Clayey Soil Characteristics Using Rice Husk Ash. **Journal of Civil Engineering and Urbanism**, v. 3, n. 1, p. 12–18, 2013.

MORAES, L. R. DE. **Melhoramento de um Solo Dispersivo com o Aditivo Lignosulfonato de Cálcio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -

Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Orientador: Prof. Nilo Cesar Consoli, 2022.

MORAIS, C. DE J. **Tentativa de Estabilização de um Solo Expansivo com Adição de Polímero Industrial**. [s.l.] Universidade Federal de Sergipe, 2018.

MOTA, M. H. A. **Concreto seco com incorporação de cinzas de madeira de Algaroba (propositis juliflora) moldado sob pressão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru. 2014.

MOURA, L. S. DE. **Incorporação de cinzas de algaroba geradas no APL de confecções do agreste pernambucano em concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. Orientadora: Ana Cecília Vieira da Nobrega., 2017.

MOUSAVI, S. E. Stabilization of compacted clay with cement and/or lime containing peat ash. **Road Materials and Pavement Design**, v. 18, n. 6, p. 1304–1321, 2017.

NALBANTOĞLU, Z. Effectiveness of class C fly ash as an expansive soil stabilizer. **Construction and Building Materials**, v. 18, n. 6, p. 377–381, 2004.

NASCIMENTO, J. E. F. et al. Cinza de biomassa rica em calcário como material carbonático em sistemas cimentícios de base Portland. **Cerâmica**, v. 65, n. 373, p. 85–91, 2019.

NASEEM, A. et al. Stabilization of Expansive Soil Using Tire Rubber Powder and Cement Kiln Dust. **Soil Mechanics and Foundation Engineering**, v. 56, n. 1, p. 54–58, 2019.

NICHOLSON, P.; KASHYAP, V.; FUJII, C. Lime and fly ash admixture improvement of tropical Hawaiian soils. **Lime and fly ash admixture improvement of tropical Hawaiian soils. Transportation research record**, v. 1440, p. 71–78, 1994.

OBUZOR, G. N.; KINUTHIA, J. M.; ROBINSON, R. B. Soil stabilisation with lime-activated-GGBS-A mitigation to flooding effects on road structural layers/embankments constructed on floodplains. **Engineering Geology**, v. 151, p. 112–119, 2012.

OKAGBUE, C. O. Stabilization of Clay Using Woodash. **Journal of Materials in Civil**

**Engineering**, v. 19, n. 1, p. 14–18, 2007.

OLIVEIRA, E. DE. **Emprego da cal na Estabilização de Solos Finos de Baixa Resistência e Alta Expandão: Estudo de caso no Município de Ribeirão das Neves/MG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC. Orientador: Glicério Trichês, 2010.

OLIVEIRA, L. C. D. DE. **A estabilização de solos aplicada a habitação, um estudo de misturas solo-cimento**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1994.

OZIER, J. M.; MOORE, R. K. Factors Affecting Unconfined Compressive Strength of Salt-Lime-Treated Clay. **Transportation Research Record**, n. 2, p. 17–24, 1977.

PAIVA, S. C. DE. **Estudo do comportamento geomecânico dos solos expansivos dos municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca- PE e de suas misturas com cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. Orientador: Silvio Romero de Melo Ferreira, 2016.

PAIVA, S. C. DE et al. Caracterização da Expansividade de um Solo Natural e Tratado com Cal do Município de Paulista-PE. **Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.**, n. Outubro, 2016a.

PAIVA, S. C. DE et al. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. **Revista Materia**, v. 21, n. 2, p. 437–449, 2016b.

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. Orientador: Osni José Pejon, 2004.

PETRY, T. M.; LITTLE, D. N. Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavements and Lightly Loaded Structures - History, Practice, and Future. **Perspectives in Civil Engineering: Commemorating the 150th Anniversary of the American Society of Civil Engineers**, n. December, p. 307–320, 2002.

PINTO, A. R. A. G. **Fibras de Curauá e Sisal como Reforço em Matrizes de Solo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Orientador: Khosrow Ghavami, 2008.

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.

PONGSIVASATHIT, S.; HORPIBULSUK, S.; PIYAPHIPAT, S. Assessment of mechanical properties of cement stabilized soils. **Case Studies in Construction Materials**, v. 11, p. e00301, 2019.

PRADO, H. DO. A pedologia simplificada. **Arquivo do Agrônomo- N° 1, 2ª ed. Ampliada e modificada. POTAFOS, Piracicaba, São Paulo**, p. 1–16, 1995.

PRESA, E. P. **Fundações em Solos Expansivos**. Universitas, Salvador, (23, especial): 99-129, 1978.

PUNTHUTAECHA, K. et al. Volume Change Behaviors of Expansive Soils Stabilized with Recycled Ashes and Fibers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 18, n. 2, p. 295–306, 2006.

RIBASKI, J. et al. Algaroba (*Prosopis juliflora*): Árvore de Uso Múltiplo para a Região Semiárida Brasileira. **EMBRAPA: Comunicado Técnico**, v. 1, n. 240, p. 8, 2009.

RIBEIRO, I. J.; CONCIANI, W. Estabilização da Expansão do Solo Saprolítico de Filito com Cal Hidratada Cálcica. **I seminário Mato-Grossense de Habitação de Interesse Social**, p. 553–561, 2005.

ROSALES, J. et al. Use of nanomaterials in the stabilization of expansive soils into a road real-scale application. **Materials**, v. 13, n. 14, p. 1–25, 2020.

RUFF, C. G.; DAVIDSON, D. . Lime and sodium silicate stabilization of montmorillonite clay soil. **Highway Research Board proceedings**, p. 107–128, 1961.

SABAT, A. K.; PRADHAN, A. Fiber reinforced- fly ash stabilized expansive soil mixes as subgrade material in flexible pavement. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 19 T, n. January 2014, p. 5757–5770, 2014.

SABINO, F. T. O encontro marcdo, 32ª ed. Rio de Janeiro, **Record**, 1981.

SALVADO, J. R. DE A. **Congelamento de solos - Estudo dos efeitos da salinidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Aveiro. Orientador: Prof. Dr. Agostinho Benta, 2012.

SANDRONI, S., CONSOLI, N.C. Sobre a Prática da Engenharia Geotécnica com Dois Solos Difíceis: Os Extremamente Moles e os Expansivos. COBRAMSEG 2010. **Anais**. PP. 97–186. 2010.

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. Orientador: Prf. Dr. Ricardo Peixoto Suassuna Dutra, 2014.

SANTOS, W. J. **Avaliação do uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três solos de Sergipe**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande. Orientador: Erinaldo Hilário Cavalcante, 2009.

SARIDE, S.; PUPPALA, A. J.; CHIKYALA, S. R. Swell-shrink and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays. **Applied Clay Science**, v. 85, n. 1, p. 39–45, 2013.

SCHEUERMANN FILHO, H. C. et al. Sustainable Binders Stabilizing Dispersive Clay. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 3, p. 1–11, 2021.

SECO, A. et al. Stabilization of expansive soils for use in construction. **Applied Clay Science**, v. 51, n. 3, p. 348–352, 2010.

SÉRGIO, P. et al. **Caracterização da Expansividade de um Solo Natural e Tratado com Cal do Município de Paulista-PE**. Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. **Anais...**2016

SIDIQ, A. et al. Investigation of Enzyme – Based Soil Stabilization in Field Application. v. 35, n. 5, p. 1–13, 2023.

SILVA, D. C. **Electrorremediação de solos contaminados com metais pesados**. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade de Coimbra, 2015.

SILVA, M. F. DA. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de

São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

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. Orientador: Prof. Wander Luis Vasconcelos, 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. Orientadora: Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello, 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.

SINGH, M.; SHARMA, R.; ABHISHEK. Soil Stabilization Using Industrial Waste ( Wheat Husk and Sugarcane Straw Ash ). **International Research Journal of Engineering and Technology(IRJET)**, v. 4, n. 9, p. 589–596, 2017.

SOFWAN; NURDIN, S. Bearing Capacity Improvement of Expansive Soil: Stabilization with Cement and Iron Oxide Additive. **MATEC Web of Conferences**, v. 331, p. 02005, 2020.

SOLOTEST. **INSTRUÇÃO DE USO, Cisalhamento Manual – Conjunto Completo**, 2023.

TENÓRIO, E. A. G. **Controle da expansão dos solos com resíduos de mármore e cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Campina Grande. Orientadoras: Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena e Carina Silvano, 2018.

TORFI, S.; KHAYAT, N.; HORPIBULSUK, S. Sustainable Stabilization of Compacted Clay Using Sodium Alginate for Subgrade Application. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 7, n. 4, p. 1–15, 2021.

TOWNSEND;, D. L.; KLYM, T. W. Durability of Lime-Stabilized Soils. **HRB Record 139, Highway Research Board, Transportation Research Board, Washington, D.C.**, p. 25–41, 1966.

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). Orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande, 2010.

WALKER, R. D.; KARABULUT, C. Effect of Freezing and Thawing on Unconfined Compressive Strength of Lime-Stabilized Soils. **Highway Research Record**, v. 92, p. 1–8, 1965.

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 stabilized black cotton soil. **International Journal of Earth Sciences and Engineering**, v. 4, n. 6, p. 42–45, 2011.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, INC., 1975.

ZHANG, F.; ZHANG, L.; HONG, W. Stabilization of Expansive Soil with Polyvinyl Alcohol and Potassium Carbonate. **Advances in Civil Engineering**, v. 2019, 2019.