



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Bruno Karasiak Meneguz

Estudo comparativo das propriedades de resistência de um solo residual melhorado com adição de cal comercial, cal de casca de ovo e cinza volante

Florianópolis

2024

Bruno Karasiak Meneguz

Estudo comparativo das propriedades de resistência de um solo residual melhorado com adição de cal comercial, cal de casca de ovo e cinza volante

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Geotecnia

Orientador(a): Prof.(a) Helena Paula Nierwinski, Dr.(a)

Florianópolis

2024

## RESUMO

A redução da extração de recursos naturais é essencial para a sustentabilidade, especialmente em projetos de construção que consomem muitos materiais. Cascas de ovo e cinzas volantes, produzidas em grandes quantidades, podem ser recicladas em vez de descartadas em aterros, contribuindo para uma economia circular. Cascas de ovo, ricas em carbonato de cálcio, podem substituir o calcário na produção de cal. Estudos indicam que a cal feita com casca de ovo tem menor impacto ambiental se comparado com a cal mineral, pois elimina os processos de extração e beneficiamento do calcário. As cinzas volantes possuem propriedades pozolânicas e têm sido utilizadas com sucesso na melhoria do solo. Este estudo teve como objetivo comparar o aumento de resistência da cal da casca do ovo com uma cal disponível comercialmente em um solo argiloso para várias porcentagens de cal e cinza volante. Também examinou o impacto da porosidade na resistência do solo melhorado. O método ICL (Consumo Inicial de Cal) foi utilizado para determinar o teor ideal de cal, com três porcentagens (3, 5 e 7%) para ambas as cals sendo testadas quanto à Resistência à Compressão Não Confinada (UCS) em três densidades diferentes e tempo de cura de 28 dias. Além disso, foi realizada uma caracterização físico-química e mineralógica da casca do ovo e da cal comercial, bem como das cinzas volantes utilizadas, por meio de granulometria a laser e análise de difração de raios X (DRX). O estudo constatou que todas as misturas melhoraram o solo estudado e que a cal com casca de ovo demonstrou melhores qualidades físico-químicas-mineralógicas para aplicações de estabilização do solo do que a cal comercial. Tanto a cal quanto as cinzas volantes foram avaliadas quanto às suas resistências em diferentes quantidades e densidades, e o estudo revelou que a cal com casca de ovo superou a cal comercial.

**Palavras-chave:** cal de casca de ovo; melhoramento de solo; cinza volante.

## ABSTRACT

Reducing the extraction of natural resources is essential for sustainability, especially in material-intensive construction projects. Eggshells and fly ash, produced in large quantities, can be recycled instead of being disposed of in landfills, contributing to a circular economy. Eggshells, rich in calcium carbonate, can replace limestone in lime production. Studies indicate that lime made from eggshells has a lower environmental impact compared to mineral lime, as it eliminates the limestone extraction and processing processes. Fly ashes can have pozzolanic properties and have been used successfully in ground improvement. This study aimed to compare the strength enhancement of eggshell lime with a commercially available lime in a clayey soil for various lime and fly ashes percentages. It also examined the impact of porosity on the strength of the treated soil. The ICL (Initial Consumption of Lime) Method was used to determine the optimal lime content, with three percentages (3, 5 and 7%) for both limes being tested for Unconfined Compressive Strength (UCS) at three different densities and a curing time of 28 days. Additionally, a physical–chemical and mineralogical characterization of both eggshell and commercial limes as well as the fly ash used was carried out using laser granulometry and X-Ray diffraction analysis (XRD). The study found that all the mixtures improved the soil studied and that eggshell limes demonstrated better physical–chemical–mineralogical qualities for soil stabilization applications than commercial lime. Both limes and fly ash were assessed for their strengths at different quantities and densities, and the study revealed that eggshell lime outperformed the commercial lime.

**Keywords:** eggshell lime; soil improvement; fly ash.

Meneguz, Bruno karasiak

Estudo comparativo das propriedades de resistência de um solo residual melhorado com adição de cal comercial, cal de casca de ovo e cinza volante / Bruno karasiak Meneguz ; orientadora, Helena Paula Nierwinski, 2024.

151 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. melhoramento de solo. 3. cal de casca de ovo. 4. cinza volante. I. Nierwinski, Helena Paula . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Bruno Karasiak Meneguz

**Título:** Estudo comparativo das propriedades de resistência de um solo residual melhorado com adição de cal comercial, cal de casca de ovo e cinza volante

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 06 de março de 2024, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.<sup>a</sup> Carina Silvani, Dra.  
UFCG

Prof.<sup>a</sup> Gracieli Dienstmann, Dra.  
UFSC

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.



Documento assinado digitalmente

**Fernanda Fernandes Marchiori**

Data: 04/07/2024 10:58:51-0300

CPF: \*\*\*.157.720-\*\*

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Coordenação do Programa de Pós-Graduação



Documento assinado digitalmente

**Helena Paula Nierwinski**

Data: 04/07/2024 11:23:41-0300

CPF: \*\*\*.415.900-\*\*

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof.<sup>a</sup> Helena Paula Nierwinski, Dra.  
Orientadora

Florianópolis, 2024

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha mãe, Marlene Karasiak, pelo apoio incondicional ao longo desses anos.

À minha orientadora, professora Helena Paula Nierwinski, pela disponibilidade, paciência e toda ajuda ao longo do mestrado.

À engenheira Tamile Kelm, por me incentivar a entrar no curso e por todo o apoio.

Ao professor Naloan Coutinho, pela ajuda no laboratório de solos.

Ao professor Carlos Eduardo Maduro de Campos pela realização do ensaio de DRX e pela interpretação dos resultados.

Ao laboratorista do LCME – UFSC, Eduardo Isoppo, pela realização dos ensaios de microscopia.

À UFSC e ao PPGEC por oferecer o curso e os meios necessários para a realização da presente pesquisa.

À Fapesc pela bolsa que possibilitou minha dedicação ao curso e à pesquisa.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Várias aplicações da cinza leve nos EUA .....	10
Figura 2.1– Mecanismo de troca catiónica.....	13
Figura 2.2 – Mecanismo de Estabilização Solo-Cal .....	15
Figura 2.3 - reações químicas e os produtos formados no solo por diferentes tipos de ligante.....	16
Figura 2.4 - Efeito do teor de cal na (a) densidade seca máxima e (b) teor de umidade ideal .....	25
Figura 2.5 – Curva de compactação de um solo argiloso com diferentes teores de cinza volante classe C (0 a 30%) .....	28
Figura 2.6 - Curvas tensão-deformação de solos argilosos tratados com cal (0 a 7%) para 30 dias de cura .....	29
Figura 2.7. Variação na resistência à compressão simples com o teor de cal em (a) solo expansivo, (b) solo não-expansivo.....	39
Figura 2.8. Efeitos do teor de cinzas volantes (a) classe C e (b) classe F na resistência à compressão não confinada com 1 dia, 7 dias e 28 dias de cura. ....	40
Figura 2.9 – RCS de três tempos de cura para 2% de cal (C) e diferentes teores de cinza volante (CV) (0% a 30%) .....	41
Figura 2.10 – Resistência à tração pelo tempo de cura de um solo tratado com 5% de cal para diferentes temperaturas .....	42
Figura 2.11 – efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal .....	43
Figura 2.12 - Variação da RCS ( $q_u$ ) pela porosidade ( $\eta$ ) para diferentes teores de cal (3%, 5%, 7%, 9% e 11%) e 28 dias de cura .....	45
Figura 2.13 - Variação da RTC ( $q_t$ ) pela porosidade ( $\eta$ ) para diferentes teores de cal (3%, 5% e 7%) e 28 dias de cura .....	45

Figura 2.14 - Variação da resistência à compressão simples com relação porosidade/quantidade de cal aos 360 dias de cura .....	48
Figura 3.1 - Localização da área de estudo.....	53
Figura 3.2 – Local do deslizamento (deslizamento) e posição da amostragem do solo estudado (Solo) .....	55
Figura 3.3 - Amostragem do solo residual de granito. ....	56
Figura 3.4 – Usina Termelétrica Jorge Lacerda – SC.....	58
Figura 3.5 – Cinza volante da Usina Jorge Lacerda – SC .....	59
Figura 3.6 – Esquema do processo experimental para a produção da cal de casca de ovos .....	62
Figura 3.7 - Solo passante na peneira #4.....	63
Figura 3.8: Ensaio do pH para os diferentes teores de cal.....	64
Figura 3.9 – Dosagem da cal pelo método do ICL. ....	65
Figura 3.10 - Corpo de prova .....	68
Figura 3.11: Prensa usada para o ensaio de compressão simples. ....	70
Figura 4.1 – Curva granulométrica realizada do material passante na peneira #4 do solo residual. ....	73
Figura 4.2 – Interpretação do resultado do ensaio de difração de raio X para a fração argila do solo. ....	74
Figura 4.2 – Curvas de Compactação para o solo e solo com 25% de cinza .....	75
Figura 4.3 – Interpretação do resultado do ensaio de difração de raio X para a (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.....	76
Figura 4.4 – Interpretação do resultado do ensaio de difração de raio X para a cinza volante ..	78
Figura 4.5 – Curva Granulométrica dos materiais .....	79
Figura 4.6 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 0% de cinza volante para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.....	81

Figura 4.7 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 12,5% de cinza volante para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.....	84
Figura 4.8 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 25% de cinza volante para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.. .....	87
Figura 4.9 – Efeito do teor volumétrico de cal dolomítica nas misturas com 0%, 12,5% e 25% de cinza volante para os $\gamma_d$ de (a) 1,5 g/cm <sup>3</sup> , (b) 1,6 g/cm <sup>3</sup> e (c) 1,7 g/cm <sup>3</sup> .....	90
Figura 4.10 – Efeito do teor volumétrico de cal de casca de ovo nas misturas com 0%, 12,5% e 25% de cinza volante para os $\gamma_d$ de (a) 1,5 g/cm <sup>3</sup> , (b) 1,6 g/cm <sup>3</sup> e (c) 1,7 g/cm <sup>3</sup> .....	94
Figura 4.11 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo. ....	96
Figura 4.12 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.....	98
Figura 4.13 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.....	100
Figura 4.14– Relação vazios/cal para as amostras com 0% de cinza volante com 28 dias de cura para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.....	101
Figura 4.15 – Relação entre $\eta/(Lv)^{0,12}$ e a RCS para as amostras de solo e cal com 28 dias de cura para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.....	103
Figura 4.16 – Relação vazios/cal para as amostras com 12,5% de cinza volante com 28 dias de cura para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.....	105
Figura 4.17 – Relação entre $\eta/(Lv)^{0,12}$ e a RCS para as amostras com 12,5% de cinza volante com 28 dias de cura para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.....	106
Figura 4.18 – Relação entre (a) $\eta/(Lv)^{0,38}$ e a RCS para cal dolomítica e (b) $\eta/(Lv)^{0,2}$ e a RCS para cal de casca de ovo para as amostras com 12,5% de cinza volante com 28 dias de cura.....	107

Figura 4.19 – Relação vazios/cal para as amostras com 25% de cinza volante com 28 dias de cura para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.....	109
Figura 4.20 – Relação entre $\eta/(Lv)^{0,12}$ e a RCS para as amostras com 25% de cinza volante com 28 dias de cura para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.....	110
Figura 4.21 – Relação entre (a) $\eta/(Lv)^{0,38}$ e a RCS para cal dolomítica e (b) $\eta/(Lv)^{0,28}$ e a RCS para cal de casca de ovo para as amostras com 25% de cinza volante com 28 dias de cura.....	111
Figura 4.23 – Corpos-de-prova submetidos à compressão simples.....	112
Figura 4.24 -Amostras de (a) solo, (b) solo + 7% de cal dolomítica e (c) solo + 7% de cal de casca de ovo, ampliadas 1.000x.....	114
Figura 4.25 -amostras de (a) solo, (b) solo com 7% de cal dolomítica e (c) solo com 7% de cal de casca de ovo ampliadas 5.000x.....	116
Figura 4.26 - as amostras de solo+25% de cinza volante com (a) 7% de cal dolomítica e com (b) 7% de cal de casca de ovo ampliadas 1.000x.....	118
Figura 4.27 - as amostras de solo+25% de cinza volante com (a) 7% de cal dolomítica e com (b) 7% de cal de casca de ovo ampliadas 5.000x.....	119

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Lista de artigos sobre melhoramento de solos com cal e cinza volante .....	17
Tabela 2.2 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento de amostras de solo controle e estabilizadas com cinza volante por 28 dias de cura.....	29
Tabela 2.3: Efeitos das variáveis na resistência à compressão simples (RCS) .....	30
Tabela 2.4 – Composição média das cales brasileiras .....	31
Tabela 2.5 - Dados dos ensaios de difração por raios-X (principais elementos) das matérias-primas e cal de casca de ovo e calcário .....	35
Tabela 2.6 – Previsão da quantidade de cal em função do tipo de solo .....	47
Tabela 3.1 – Etapas e Ensaio do Programa Experimental .....	51
Tabela 3.2 – Caracterização da cal utilizada .....	57
Tabela 3.3 - Composição química da cal de casca de ovo não hidratada .....	57
Tabela 4.1 – Resumo dos resultados dos ensaios de análise granulométrica, limites de Atterberg e massa específica dos grãos .....	72
Tabela 4.2 - Composição química dos aditivos utilizados.....	76
Tabela 4.3: Tamanho das partículas de cal e cinza volante.....	79
Tabela 4.4: RCS média das misturas de solo e cal.....	81
Tabela 4.5: RCS média das misturas de solo e cal com 12,5% de cinza volante.....	83
Tabela 4.6: RCS média das misturas de solo e cal com 25% de cinza volante.....	86
Tabela 4.7: RCS média das misturas de solo e cal dolomítica.....	89
Tabela 4.8: RCS média das misturas de solo e cal de casca de ovo.....	92

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ASTM: American Society for Testing and Materials

L: teor de cal calculado em relação à massa de solo

$L_v$ : teor volumétrico de cal, expresso em porcentagem do volume total

CV: Cinza Volante  $D_{10}$ : diâmetro efetivo

$e$ : base do logaritmo neperiano (2,7183)

$e$ : índice de vazios

LL: limite de liquidez

LMS: Laboratório de Mecânica dos Solos

LP: limite de plasticidade

MQ: Média Quadrada

NBR: Norma Brasileira

PCA: Portland Cement Association

$q_u$ : resistência à compressão simples

TRB: Transportation Research Board

UFSC: Universidade Federal de Santa Catarina

USACE: United States Army Corps of Engineers

USBR: United States Bureau of Reclamation

VI: volume de cal

$V_v$ : volume de vazios (igual ao volume de água mais o volume de ar)

$\gamma_d$ : peso específico aparente seco

$\eta$ : porosidade

$\omega$ : teor de umidade

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS.....	3
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivos Específicos.. ..</b>	<b>3</b>
1.1	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	4
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1	ESTABILIZAÇÃO DO SOLO .....	5
<b>2.1.1</b>	<b>Estabilização Mecânica.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Estabilização Química .....</b>	<b>6</b>
2.1.2.1	<i>Estabilização de solo com cal.....</i>	6
2.2	USO DA CASCA DE OVO PARA PRODUÇÃO DE CAL.....	8
2.3	PRODUÇÃO DE CINZA VOLANTE E SEU USO COMO AGENTE ESTABILIZADOR DE SOLO.....	9
2.4	REAÇÕES SOLO-CAL.....	12
2.5	CARACTERÍSTICAS COMPORTAMENTAIS DE MISTURAS SOLO-CINZA-CAL.....	17
<b>2.5.1</b>	<b>Índice de plasticidade.....</b>	<b>22</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Compactação .....</b>	<b>23</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Expansão.....</b>	<b>26</b>
<b>2.5.4</b>	<b>Resistência.....</b>	<b>27</b>
2.6	VARIÁVEIS DETERMINANTES DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS SOLO-CINZA-CAL.....	31
<b>2.6.1</b>	<b>Solo.....</b>	<b>32</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Cal mineral .....</b>	<b>33</b>
<b>2.6.3</b>	<b>Cal de casca de ovo.....</b>	<b>34</b>
<b>2.6.4</b>	<b>Cinza volante . .....</b>	<b>36</b>
<b>2.6.5</b>	<b>Teores de cal e cinza .. ..</b>	<b>37</b>
<b>2.6.6</b>	<b>Efeito do tempo e temperatura de cura.....</b>	<b>41</b>

<b>2.6.7</b>	<b>Efeito do teor de umidade e da relação água/cal .....</b>	<b>44</b>
<b>2.6.8</b>	<b>Efeito da densidade e porosidade .....</b>	<b>44</b>
<b>2.6.9</b>	<b>Dosagem da cal .....</b>	<b>46</b>
<b>2.6.10</b>	<b>Relação porosidade/volume de cal e tempo de cura na resistencia à compressão simples .....</b>	<b>48</b>
<b>3.</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>46</b>
<b>3.1</b>	<b>MATERIAIS .....</b>	<b>49</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Solo .....</b>	<b>49</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Cal dolomítica .....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Cal de casca de ovo hidratada .....</b>	<b>53</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Cinza volante . .....</b>	<b>53</b>
<b>3.1.5</b>	<b>Água .....</b>	<b>55</b>
<b>3.2</b>	<b>MÉTODOS .....</b>	<b>55</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Coleta dos materiais utilizados .....</b>	<b>55</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Produção de cal hidratada a partir da casca do ovo .....</b>	<b>56</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Preparação das amostras de solo .....</b>	<b>57</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Ensaio de caracterização.....</b>	<b>59</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Dosagem .....</b>	<b>59</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Moldagem e Cura dos Corpos-de-prova para o ensaio de compressão simples.....</b>	<b>61</b>
<b>3.2.7</b>	<b>Controle de qualidade das amostras .....</b>	<b>64</b>
<b>3.2.8</b>	<b>Ensaio de compressão simples .....</b>	<b>64</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>67</b>
<b>4.1</b>	<b>ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....</b>	<b>67</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Solo .....</b>	<b>67</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Cales e cinza volante .....</b>	<b>71</b>
<b>4.2</b>	<b>ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES .....</b>	<b>76</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Efeito dos teores de cal e comparativo entre as cales .....</b>	<b>76</b>

4.2.1.1	<i>Misturas com cal</i> .....	76
4.2.1.2	<i>Misturas com cal e 12,5% de cinza volante</i> .....	80
4.2.1.3	<i>Misturas com cal e 25,0% de cinza volante</i> .....	83
<b>4.2.2</b>	<b>Efeito da adição de cinza</b> .....	<b>86</b>
4.2.2.1	<i>Misturas com cal dolomítica</i> .....	86
4.2.2.2	<i>Misturas com cal de casca de ovo</i> .....	89
<b>4.2.3</b>	<b>Efeito da porosidade</b> .....	<b>93</b>
4.2.3.1	<i>Misturas solo e cal</i> .....	93
4.2.3.2	<i>Misturas de solo e cal com 12,5% de cinza volante</i> .....	95
4.2.3.3	<i>Misturas solo e cal com 25,0% de cinza volante</i> .....	96
<b>4.2.4</b>	<b>Efeito da relação porosidade/teor volumétrico de cal</b> .....	<b>98</b>
4.2.4.1	<i>Misturas solo e cal</i> .....	98
4.2.4.2	<i>Misturas solo+cal+12,5% de cinza</i> .....	101
4.2.4.3	<i>Misturas solo+cal+25% de cinza</i> .....	105
<b>4.2.5</b>	<b>Modos de ruptura</b> .....	<b>110</b>
4.3	ENSAIO DE MICROSCOPIA.....	110
<b>4.3.1</b>	<b>Imagens de solo e misturas de solo+cal dolomítica e solo+cal de casca de ovo</b> .....	<b>110</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Misturas de solo+cal+25% de cinza para ambas as cales</b> .....	<b>112</b>
<b>4.4</b>	<b>COMPARATIVO COM A LITERATURA E AVALIAÇÃO DE APLICABILIDADE PRÁTICA DAS MISTURAS</b> .....	<b>114</b>
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>116</b>
5.1	CONCLUSÕES.....	116
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	117
	REFERÊNCIAS.....	118
	APENDICE.....	132

## 1. INTRODUÇÃO

A otimização das características do solo para atender aos requisitos específicos de um projeto é uma preocupação recorrente em diversas obras geotécnicas. Diante da escassez crescente de áreas adequadas para construção, frequentemente é necessário modificar as propriedades do terreno para atender aos padrões estabelecidos. Nesse contexto, a prática de tratamento do solo com aditivos torna-se uma abordagem comum, visando ajustar suas propriedades geotécnicas conforme as exigências do projeto.

A estabilização do solo por meio de diferentes aditivos é uma área de pesquisa em constante desenvolvimento, visando reduzir os custos de construção em solos problemáticos. O termo "solo estabilizado" refere-se a um material composto que combina e otimiza as propriedades dos materiais constituintes. A inclusão de agentes cimentantes, como cal, cimento e subprodutos industriais como cinzas volantes e escória, melhora significativamente as propriedades geotécnicas do solo (Firoozi et al., 2017), potencialmente resultando em economia nos custos de infraestrutura, como estradas e fundações (Ingles & Metcalf, 1972).

A cal, um dos materiais de construção mais antigos conhecidos, tem sido utilizada há mais de dois milênios, desde os tempos romanos, em misturas de solo para construção de estradas. No entanto, sua aplicação na engenharia geotécnica moderna foi limitada até meados do século XX, devido à falta de compreensão adequada (Herrin & Mitchell, 1961). Atualmente, a estabilização do solo com cal é amplamente empregada em diversas estruturas, devido principalmente ao seu custo relativamente baixo em comparação com outros materiais (Chittoori et al., 2012).

Um desafio enfrentado na estabilização do solo é o custo associado à adição de diferentes materiais. Uma alternativa promissora é o uso de resíduos industriais que possam melhorar as propriedades geotécnicas do solo, reduzindo os custos da obra e proporcionando uma destinação sustentável para esses materiais. As cinzas volantes, subproduto da queima de carvão mineral, possuem propriedades pozolânicas e podem ser empregadas para aumentar a resistência do solo (Kim & Prezzi, 2008; Phanikumar & Sharma, 2004).

Embora relativamente recente, a pesquisa indica que a cal de casca de ovo pode ser uma alternativa à cal comercial, apresentando composição química similar à cal de calcário e alto grau de pureza, especialmente em comparação com a cal dolomítica predominante em certas regiões (Guimarães, 2002). Este estudo se propõe a investigar o papel da adição de cal

de casca de ovo e cinzas volantes nas propriedades de resistência à compressão simples de um solo residual de granito, com ênfase na região de Florianópolis-SC. A pesquisa, por meio de ensaios de caracterização e análises microestruturais, visa avaliar a eficácia desses aditivos, comparando também com a cal comercial mineral.

Além de contribuir para o conhecimento sobre solos melhorados, este trabalho busca oferecer uma solução sustentável para a reciclagem de resíduos de casca de ovo, explorando seu potencial na produção de cal, e para o uso do cinza volante como agente estabilizador de solo. Essa abordagem não apenas oferece uma solução técnica e econômica para melhorar a resistência do solo, mas também reduz os problemas associados à deposição desses resíduos em aterros, contribuindo para a conservação de recursos naturais.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é comparar o efeito da adição da cal de casca de ovo em relação à adição da cal comercial, assim como os efeitos da adição de cinza volante sobre propriedades de resistência à compressão simples em um solo residual de granito, variando-se a porosidade e as dosagens das misturas.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Comparar o desempenho de misturas com utilização de uma cal comercial mineral e a cal de casca de ovos;
- Verificar a resistência a compressão simples entre as misturas com cal comercial e cal de casca de ovos;
- Verificar a resistência a compressão simples das misturas com adição de cinza volante em relação às misturas sem adição de cinza volante;
- Verificar de que forma as variáveis de interesse (tipo e quantidade de cal, quantidade de cinza volante, porosidade da mistura compactada) afetam a resistência à compressão simples das misturas e apresentar a relação entre porosidade, cal e cinza volante mais indicada para estabilização do solo em estudo.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em 5 capítulos. O capítulo 1 apresenta uma introdução do assunto estudado e são expostas as diretrizes para o desenvolvimento deste trabalho, assim como o objetivo principal e secundário.

No capítulo 2 é realizada a revisão bibliográfica dos assuntos abordados neste trabalho. É apresentado o comportamento dos solos melhorados com cal e cinza, enfatizando o efeito que cada material provoca e a influência das variáveis estudadas.

No capítulo 3 será apresentado o programa experimental que será seguido para a realização do trabalho. No capítulo 4 serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais e resistência a compressão simples e o capítulo 5 trará a conclusão e sugestões de trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo serão apresentadas algumas técnicas de estabilização de solo de maneira geral, com ênfase na estabilização de solo com cal e com cinza de termelétrica à carvão mineral, que serão os focos desse trabalho.

### 2.1 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO

De acordo com Essler (2012), a estabilização do solo pode ser definida como a introdução de materiais ou energia nos solos para promover uma mudança no desempenho do solo e possa ser incorporado no processo de projeto. Técnicas de melhoramento do solo são utilizadas em todo o mundo para melhorar a capacidade de suporte e a estabilidade do solo, para permitir a construção de projetos com vidas úteis longas, como aterros, muros de contenção e pontes (Cofra, 2005).

A estabilização do solo tem sido usada por muitos anos como um método econômico, ambientalmente favorável e eficiente para o tratamento do solo. É um método que pode ser adaptado para atender às demandas específicas do projeto de engenharia (Castro-Fresno *et al.*, 2011, Amiralian, 2013, Ramadas *et al.*, 2011). Neste sentido, os métodos de estabilização do solo podem ser divididos em três categorias (Ingles e Metcalf, 1972):

- Estabilizadores químicos, aditivos sólidos ou líquidos que interagem e modificam a estrutura das partículas do solo;
- Estabilizadores físicos, que modificam o solo por processos de calor ou eletricidade;
- Estabilizadores mecânicos que não modificam as partículas do solo.

#### 2.1.1 Estabilização Mecânica

A estabilização mecânica é realizada pela mistura de dois ou mais tipos de solos naturais para obter uma combinação de melhor qualidade e graduação, em comparação com seus componentes separados. Para preparar a combinação desejada, a proporção de partículas finas e grossas da mistura é ajustada adicionando ou removendo cada componente do solo. A combinação de solo recém-preparado deve melhorar as propriedades de resistência do solo,

além de aumentar a capacidade de carga do mesmo, controlando o atrito interno e a coesão (Kirsch e Bell, 2013).

### **2.1.2 Estabilização Química**

De acordo com Terashi (2003), as propriedades da mistura solo-aglutinante dependem das características do aglutinante, das características e condições do solo, das condições de cura e das condições de mistura. Segundo Han (2015), os materiais mais usados como aditivos são cimento, cal, cinza volante e escória

Segundo Castro-Fresno *et al.* (2011), a escolha dos estabilizadores, no entanto, depende das condições da área selecionada para construção, juntamente com considerações econômicas. Nesta seção, considerando o escopo do trabalho, serão apresentados apenas os conceitos de estabilização de solo com cal e com cinza de carvão mineral.

#### *2.1.2.1 Estabilização de solo com cal*

A cal, quando adicionada ao solo em pequenas quantidades (<5%), além de modificar as características de plasticidade e expansão, também pode estabilizar os solos através da cimentação, dando origem a aumentos visíveis na resistência e rigidez (Ingles e Metcalf, 1972; Bell, 1996; Rajasekaran e Rao, 2000; Consoli *et al.*, 2011). A cimentação é atribuída principalmente a reações pozolânicas e pode melhorar significativamente o desempenho a longo prazo dos solos estabilizados (Rogers *et al.*, 2006; Khattab *et al.*, 2007).

De acordo com Nunez (1991), o uso da cal no tratamento de solos é o mais antigo método de estabilização química conhecida. Utiliza-se uma mistura solo-cal, por exemplo, quando não se dispõem de materiais que satisfaçam características de resistência, deformabilidade e permeabilidade adequadas ao projeto.

Guimarães (2002) cita algumas obras antigas executadas com o uso da estabilização de solo com cal, tais como:

- A grande Muralha da China (aproximadamente 200a.C);
- Uma muralha na cidade bíblica de Jericó construída em torno de 1.000a.C.;
- Construções feitas pelos índios americanos pré-colombianos;

- Construções romanas: Santuário de Fortuna (Palestina) – 80a.C.; Teatro de Pompéia - 55AC; Panteão Romano; vários aquedutos em Roma, Segóvia, Constantinopla e França; construções militares;
- Na Baía de todos os Santos, em 1549, é construída a primeira mina do Brasil para a extração de calcário dos depósitos conchíferos que revestem o fundo do mar á fim de produzir cal para o revestimento das construções que, na época, eram feitas de taipa (barro socado) e para argamassa de construção.

No entanto, a utilidade da cal como agente melhorador de solo em aplicações modernas de engenharia geotécnica foi limitada até 1945, principalmente devido à falta de compreensão adequada do assunto (Herrin e Mitchell, 1961). Atualmente, a estabilização de solos com cal é amplamente utilizada em diversas estruturas, como rodovias, ferrovias, aeroportos, aterros, bases de fundações, proteção de taludes, revestimentos de canais, entre outros (Smith et al., 2020; Brown e Jones, 2022).

O uso da cal como alternativa para melhoria das propriedades mecânicas do solo se deve principalmente ao seu relativo baixo custo em relação a outros materiais ou à substituição do solo local por outro solo com melhores propriedades geotécnicas (Consoli *et al.*, 2011). De acordo com Han (2015), o emprego da estabilização com cal usualmente ocorre na construção de estradas, como base ou sub-base de pavimentos e na proteção de taludes contra a erosão hidráulicas. De acordo com Thomé (1994), a técnica de melhoramento do solo com cal também pode ser utilizada nas fundações de edificações de pequeno porte, em solos com baixa capacidade de suporte ou que apresentam baixa estabilidade volumétrica. Tais condições são problemáticas na medida em que podem causar severas patologias na edificação.

Segundo Guimarães (2002), o uso expressivo de solo-cal em rodovias brasileiras iniciou-se na década de 50. O autor relatou algumas experiências de sucesso em pistas experimentais de solo-cal no Brasil, entre elas:

- Aeroporto de Congonhas (São Paulo) – na área de hangares da Varig (10.000m<sup>2</sup>) foi construída uma base de solo-cal-agregado, com 6% de cal hidratada;
- Rodovia Curitiba/Porto Alegre (Paraná) – próximo ao km10, com 1000 metros de extensão. Foi utilizado um solo siltoso, com 3% e 7% de cal;
- Rodovia Brasília/Fortaleza (Distrito Federal) – proximidades de Sobradinho, foram construídos dois trechos de 150 metros cada e bases com 1% e 3% de cal;

- Avenida Sernambetiba – Guanabara (Rio de Janeiro) – trecho de 18km, com base de 3% a 4% de cal;
- Rodovia Cruz Alta/Carazinho (BR-377/RS) – dois trechos experimentais em solo argiloso com 4% de cal.

Vários estudos de caso destacaram a aplicação da estabilização com cal na melhoria do desempenho de solos problemáticos (Joshi *et al.*, 1981; Petry e Little, 2002; Wilkinson *et al.* 2010, Dash e Hussain, 2012; Kumar *et al.*, 2020; Tonini *et al.*, 2021; Favretto, 2020).

## 2.2 USO DA CASCA DE OVO PARA PRODUÇÃO DE CAL

A produção da cal através do calcário, por outro lado, gera impactos ambientais negativos relacionados à mineração (Guimarães, 2002). Recentemente, estudos demonstraram que a cal produzida a partir da calcinação da casca do ovo pode ser um excelente substituto da cal mineral, reduzindo a necessidade de extração de calcário e dando um destino ao resíduo do ovo, que atualmente é descartado em aterros sanitários (Zaman *et al.*, 2018; Oliveira *et al.*, 2013; Ferraz *et al.*, 2018; Favretto, 2020; Tonini *et al.*, 2021). De acordo com a Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2023), somente em 2020 o consumo médio de ovos foi 251 unidades por pessoa, gerando 331.320 toneladas de casca, que poderiam ser transformadas em cerca de 150 mil toneladas de cal.

Segundo Ferraz *et al.* (2018), o carbonato de cálcio presente na casca do ovo pode ser transformado em óxido de cálcio, posteriormente em hidróxido de cálcio (cal calcítica) e finalmente utilizado como aglutinante (material de construção) em argamassa.

Tonini *et al.* (2021) mostraram que a utilização dos resíduos de casca de ovo na fabricação de cal traz alguns benefícios, como: reduzir os custos de destinação de um resíduo que atualmente é descartado em aterro; conservar o ambiente, promovendo a exploração racional do calcário, um recurso não renovável; e diminuir os custos totais de produção ao reduzir o processo de extração e britagem do calcário.

## 2.3 PRODUÇÃO DE CINZA VOLANTE E SEU USO COMO AGENTE ESTABILIZADOR DE SOLO

A cinza volante é um subproduto industrial gerado durante a combustão do carvão. Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE, 2013), mais de 65% das cinzas volantes

produzidas no mundo são descartadas em aterros sanitários, sendo que encontrar aplicações viáveis deste material não só é uma conveniência como uma necessidade. Neste aspecto, de acordo com Consoli *et al.* (2014b), muitas características das cinzas volantes, como baixa compressibilidade, alta resistência ao cisalhamento, e características pozolânicas, oferecem-lhe um papel importante na melhoria das propriedades do solo em aplicações geotécnicas. Dessa forma, segundo Turan *et al.* (2022), a estabilização de solos com a adição de cinzas volantes não só aborda as questões ambientais da eliminação de cinzas volantes, mas também pode fornecer soluções tecnológicas para a melhoria do solo.

Ainda de acordo com a AIE (2013), as centrais elétricas a carvão em todo o mundo produzem quase 25% das necessidades de energia primária do mundo, ou seja, 38% da eletricidade mundial é gerada a partir destas centrais. Ao longo das últimas décadas, a cinza volante tem sido apontada como um resíduo sólido problemático devido aos métodos convencionais de eliminação da mesma, uma vez que contaminaram e degradaram terras aráveis em todo o mundo (Barnes e Sear, 2006).

Abmaruzzaman (2018) destacou que aproximadamente 80% do total de cinzas de carvão produzidas em todo o mundo estava na forma de cinza volante. As cinzas volantes são o quinto maior recurso de matéria-prima do planeta e podem ser utilizadas como alternativa aos materiais convencionais na construção de infraestruturas geotécnicas e geoambientais (Smith e Johnson, 2021).

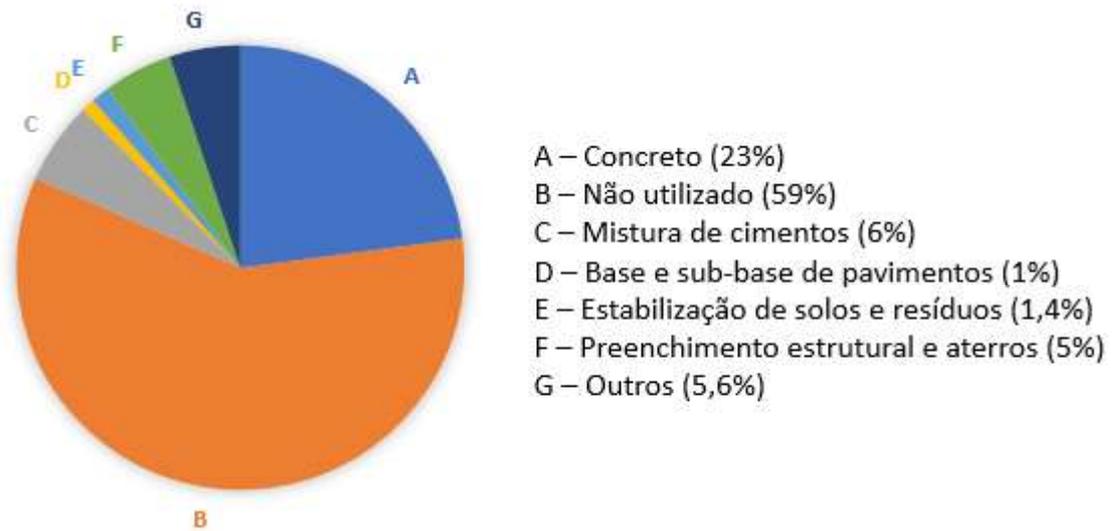
Segundo a *American Coal Ash Association* (ACAA, 2020), as cinzas volantes têm uma ampla gama de aplicações na indústria da construção, porém, como se observa na Figura 1.1, 59% do total produzido não é utilizado e acaba em aterros, uma porção considerável é utilizada como parte da composição do cimento e menos de 10% é usado como estabilizador de solo.

Uma das maiores produções de cinzas volantes ocorre em termelétricas. No Brasil, segundo o Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA, 2023), as termelétricas somam uma capacidade de geração de aproximadamente 3,02 gigawatts, e seu uso vem crescendo a cada ano, sendo seu principal combustível o carvão mineral, devido ao seu baixo custo em relação a outros combustíveis. Os principais estados produtores de cinza volante são o Rio Grande do Sul e Santa Catarina, sendo que quase 30% da produção está concentrada no Completo Termelétrico Jorge Lacerda, em Capivari de Baixo (Siecesc, 2021).

Além das cinzas de termelétricas, as cinzas provenientes da incineração de resíduos sólidos municipais possuem características físicas e químicas bastante semelhantes às das

cinzas volantes, e podem ser uma alternativa viável à utilização da cinza para melhora de propriedades dos solos (Lee *et al.*, 1996)

Figura 1.1 - Várias aplicações da cinza leve nos EUA



Fonte: adaptado de ACAA (2020)

As cinzas volantes possuem um grande número de aplicações dentro da engenharia civil. Seus usos mais comuns em projetos de geotecnia incluem aterros, taludes, como material de base para fundações ou rodovias e em estruturas de retenção de água. Seu uso como aditivo resulta em um solo estabilizado de menor retração em comparação, por exemplo, com solos moles tratados apenas com cal ou cimento (Tonini *et al.*, 2021; Turan *et al.*, 2022)

Segundo Han (2015), o uso de cinzas volantes como aditivo para solos é atraente porque as cinzas volantes são um subproduto industrial relativamente barato comparado ao cimento e à cal.

A cinza volante, comparada à solos argilosos, possui baixo peso unitário e compressibilidade (Seco *et al.*, 2011). Segundo Mir e Sridharan (2021), o teor efetivo de cinzas volantes para melhorar as propriedades de engenharia do solo varia entre 15 a 30%, dependendo do tipo de solo, sendo comprovado por Turan *et al.* (2022) e Consoli *et al.* (2014b) que pode ser utilizada com sucesso como aditivo para a construção de camadas de base e sub-base de pavimentos, bem como para a construção de aterros em solos moles.

Por possuírem grandes quantidades de materiais siliciosos e aluminosos (pozolanas), é possível que ocorram reações pozolânicas entre a cinza e o solo na presença de cálcio

(presente na cinza ou acrescentado), melhorando substancialmente suas propriedades geotécnicas. Quando a quantidade de cálcio é insuficiente para que as referidas reações ocorram, as cinzas podem ser usadas em conjunto com outros aditivos, como cal ou ativadores alcalinos, para obter propriedades mecânicas mais altas (Turan *et al.*, 2022).

Seu papel no processo de estabilização é atuar como pozolana e/ou produto de enchimento para reduzir vazios de ar. Devido à sua granulometria fina (partículas do tamanho de silte ou menores), uma aplicação comum de uma mistura de cimento/cinzas volantes é estabilizar solos de granulação grossa que possuem poucos ou nenhum grão fino (Gomes e Silva, 2019).

Devido aos volumes de materiais envolvidos na construção de estradas, ferrovias e aeroportos, entre outros grandes projetos geotécnicos, a utilização de cinzas volantes tem um profundo impacto do ponto de vista ambiental (Celauro *et al.*, 2012).

De acordo com Cetin e Aydilek (2013), a utilização de cinzas volantes na engenharia geotécnica não só ajuda a aliviar um dos problemas ambientais mais proeminentes, a eliminação de resíduos, mas também pode resultar em:

- redução dos custos de eliminação de resíduos sólidos incorridos pela indústria;
- redução dos requisitos de aterros;
- minimizar os danos aos recursos naturais causados pela escavação de materiais minerais para construção;
- conservação da energia de produção;
- proporcionar crescimento econômico.

Uma questão crítica em todo o mundo é a escassez de materiais de construção convencionais. Ao mesmo tempo, grandes quantidades de resíduos industriais causam sérios problemas ambientais. Além disso, algumas falhas imprevisíveis de lagoas de cinzas podem afetar terras agrícolas e poluir rios em até 100 quilômetros de distância, colocando, assim, em risco a vida humana (Ghosh, 2010).

A aplicação de cinzas volantes em projetos de engenharia não só oferece a vantagem da conservação parcial de recursos, mas também é uma solução econômica promissora para problemas geoambientais. As cinzas volantes podem ser utilizadas na fabricação de cimento, como substituto parcial do cimento em argamassa e concreto, na fabricação de tijolos, blocos,

telhas, telhas e outros componentes de construção, em aterros e diques estruturais, para construção de estradas/aterros e preenchimento de minas (Behara e Mishra, 2012; Ramadas *et al.*, 2011, Sezer, 2006; Kim e Prezzi, 2008; Ghosh, 2010; Senol, 2006).

Segundo Consoli *et al.* (2014b), a utilização de solo estabilizado com adição de cinzas volantes tem o duplo benefício da remoção de materiais nocivos do ambiente e, ao mesmo tempo, da utilização de materiais de construção baratos.

## 2.4 REAÇÕES SOLO-CAL

Eades e Grim (1960), Ingles e Metcalf (1972), Little (1996), Boardman *et al.* (2001), Al-Mukhtar *et al.* (2010a, 2010b) e Cuisinier *et al.* (2011) atribuíram as melhorias nas propriedades geotécnicas dos solos estabilizados pela cal à quatro reações básicas: troca catiônica, floculação e aglomeração, carbonatação da cal e, finalmente, a reação pozolânica. Os três primeiros tipos de reações podem ser considerados reações instantâneas. No entanto, a reação pozolânica, considerada o parâmetro chave na estabilização do solo-cal, é uma reação dependente do tempo.

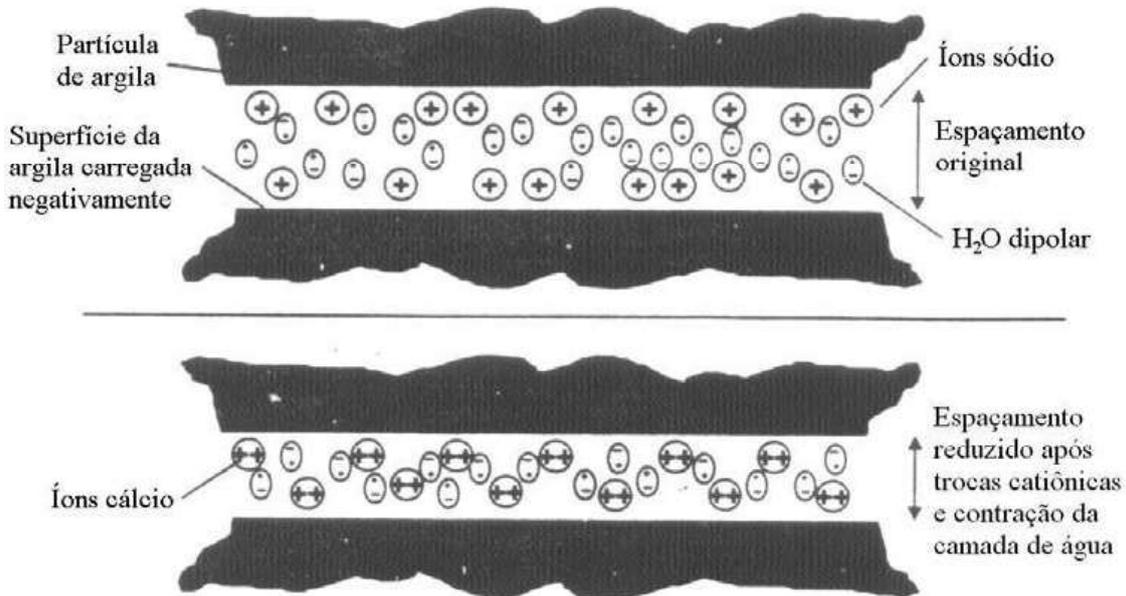
### *1ª fase (Instantânea)*

Segundo Han (2015), com a introdução da cal no ambiente do solo, o  $\text{Ca(OH)}_2$  é dissolvido em água e o  $\text{Ca}^{2+}$  e  $(\text{OH})^{-1}$  são liberados (Equações 1 e 2). A troca catiônica ocorre entre cátions ligados às camadas de argila e  $\text{Ca}^{2+}$ . As partículas de argila são circundadas por uma camada hidratada difusa que é modificada pela troca iônica do cálcio. Isto modifica a densidade da carga elétrica em torno das partículas de argila e as atrai para mais perto umas das outras para formar flocos (floculação), como mostrado na Figura 2.1.



Segundo Prusinski e Bhattacharja (1999), a floculação implica em forças de atração mais fortes entre as camadas e um empilhamento de um maior número de camadas (aglomeração). Estas reações alteram a textura da argila, proporcionando partículas mais espessas, reduzindo a plasticidade e aumentando a resistência do solo (Basma e Tuncer, 1991; Khattab, 2002).

Figura 2.1– Mecanismo de troca catiônica.



Fonte: adaptado de Prusinski e Bhattacharja (1999).

Na carbonatação, segundo Al-Mukhtar *et al.* (2012), a cal hidratada  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ , e o dióxido de carbono atmosférico ( $\text{CO}_2$ ) reagem para produzir cristais de calcita  $\text{CaCO}_3$ . Os cristais de calcita podem ligar partículas de argila, mas de forma fraca (solúvel em água), além de reduzirem o  $\text{Ca}^+$  total disponível para a reação pozolânica.

#### *2ª fase (reações de longo prazo)*

A adição de quantidade suficiente de cal induz um ambiente altamente alcalino ( $\text{pH} \geq 12$ ), o que ajuda a promover a dissolução lenta da argila e a formação de ânions aluminato e silicato (Han, 2015). Os cátions  $\text{Ca}^{2+}$  podem ligar-se aos ânions aluminato e silicato para formar géis hidratados de silicato de cálcio (CSH), aluminato de cálcio (CAH) e silicato de aluminato de cálcio (CASH) (Equações 3 e 4):

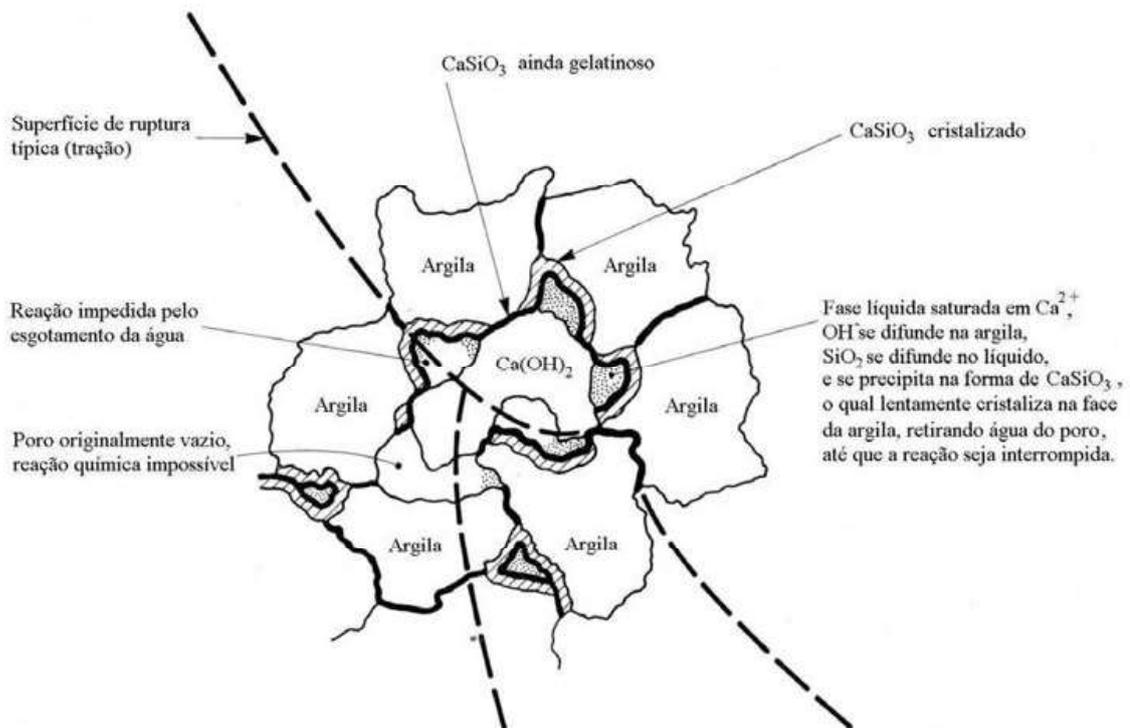


De acordo com Al-Mukhtar *et al.* (2012), o mecanismo da reação pozolânica cal-argila pode ser descrito pela dissolução progressiva de grandes cristais de argila (a partir da borda da partícula). Dessa forma, a reação da cal é um ataque básico que promove uma destruição progressiva dos aluminossilicatos; folhas octaédricas e tetraédricas são lentamente dissolvidas, seguida pela síntese de CAH, CSH e CSAH, géis cimentícios estáveis e que não se dissolvem

em água, desde que o ambiente de pH alto seja mantido. Este processo de reação é chamado de reação pozolânica. Os produtos deste processo são chamados de produtos da reação pozolânica. Segundo Ingles e Metcalf (1972), esses produtos transformam o solo em um sólido endurecido com alta resistência e rigidez. A fonte das pozolanas (um material silicioso ou aluminoso) pode ser o solo ou um outro aditivo (cinzas volantes, por exemplo) (Han, 2015).

Conforme Ingles e Metcalf (1972), os géis de silicato resultantes da reação imediata cobrem e ligam as partículas de argila, bloqueando os vazios. Os géis são cristalizados lentamente e transformados em silicatos hidratados de cálcio bem definidos. Este mecanismo é mostrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Mecanismo de Estabilização Solo-Cal

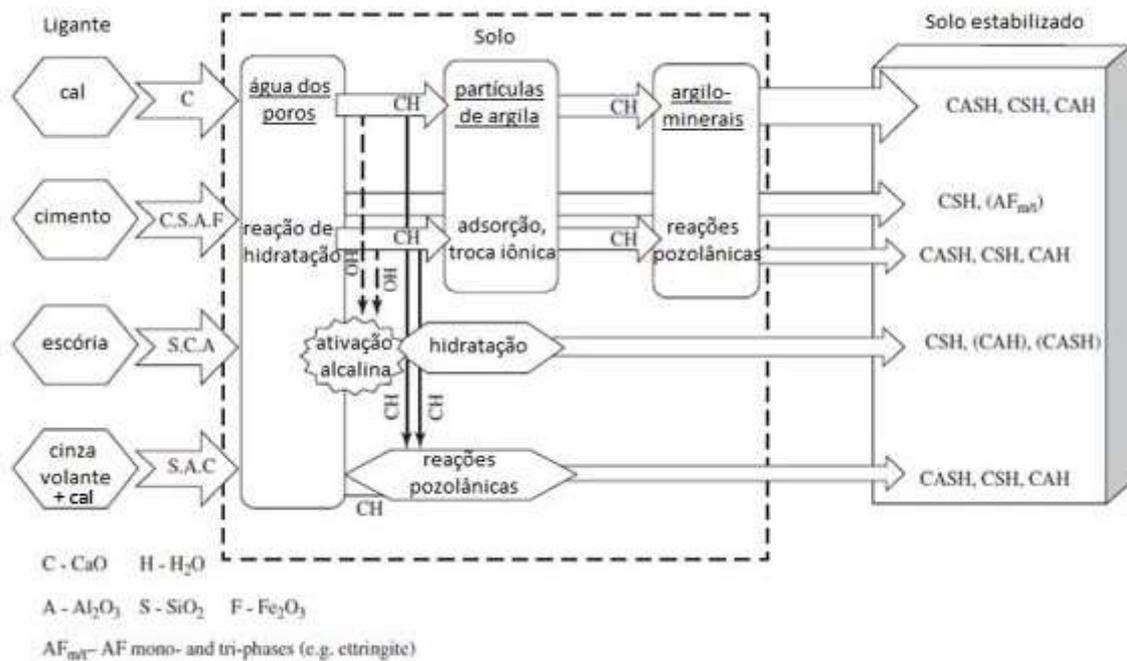


Fonte: adaptado de Ingles e Metcalf (1972).

Os hidratos de cálcio formados durante a reação pozolânica com a sílica e a alumina liberadas do argilomineral e da cal (íons cálcio e hidroxila), são semelhantes aos do cimento hidratado (Portland): silicato de cálcio hidratado (CSH) e /ou hidrato de aluminato de silicato de cálcio (CSAH) e/ou hidrato de aluminato de cálcio (CAH) (Al-Mukhtar *et al.*, 2010a; Al-Rawas e Goosen, 2006; Arabi e Wild, 1986; Bell, 1996; Boardman *et al.*, 2001; Diamond e Kinter, 1965; Khattab, 2002; Rogers e Glendinning, 2000; Han, 2015). A Figura 2.3 ilustra as reações químicas e os produtos formados no solo por diferentes tipos de ligantes.

Esta cristalização, embora lenta no início, continuará enquanto o cálcio residual e sílica ou alumínio estiverem disponíveis e o pH for suficientemente elevado. De acordo com Han (2015), os produtos da reação pozolânica do solo resultam em resistências mais baixas no curto prazo, mas em longo prazo, resultam em resistências mais altas do que os produtos da reação do cimento.

Figura 2.3 - reações químicas e os produtos formados no solo por diferentes tipos de ligantes



(Fonte: adaptado de Han (2015))

Segundo Tastan (2011), as reações cal-solo contribuem para a estabilização dos solos de duas maneiras. Primeiro, a plasticidade do solo é reduzida pela troca de íons cálcio na água dos poros com cátions monovalentes nas superfícies argilosas e pela compressão da camada adsorvida devido à elevada força iônica da água dos poros (Rogers e Glendinning, 2000). Em segundo lugar, os géis CSH ou CASH formados por reações cimentícias e pozolânicas unem as partículas sólidas, e esta ligação produz uma matriz de solo mais forte Ingles e Metcalf (1972).

## 2.5 CARACTERÍSTICAS COMPORTAMENTAIS DE MISTURAS SOLO-CINZA-CAL

A primeira resposta da mistura solo-cal será a redução do índice de plasticidade e melhoria da trabalhabilidade e a segunda será o ganho de resistência através da cimentação das partículas (Ingles e Metcalf, 1972; TRB, 1987).

Guimarães (2002) afirma que, de modo geral a cal afeta favoravelmente as propriedades dos solos, o que se reflete em variações das características físicas como a granulometria, a plasticidade, a contração e retração, a umidade de campo, a densidade e a trabalhabilidade, a compactação, a resistência e a permeabilidade.

Solos estabilizados mediante a adição de cal, constituem-se, em última análise, em um novo material geotécnico artificialmente cimentado. O comportamento mecânico deste novo material, entre outras características, pode diferir, significativamente, daquele que caracteriza o solo natural, não cimentado, uma vez que tenha havido êxito na execução do processo de estabilização.

Ainda, estudos mostraram que a adição de cinzas volantes ao solo melhorou consideravelmente diversos parâmetros do mesmo, como limites de consistência, densidade seca máxima e teor de umidade ideal, potencial de expansão e resistência a compressão (Mir e Sridharan, 2021; Nath *et al.*, 2021; Seyrek, 2018; Turan *et al.*, 2022). Além disso, para cada parâmetro existe um valor ótimo de cinzas volantes no qual o valor mais desejável é obtido.

A estabilização de diferentes tipos de solo com cal com ou sem a adição de cinzas volantes tem incentivado vários pesquisadores a realizar estudos experimentais e/ou de campo. Os estudos mais recentes sobre solos (principalmente argilas) estabilizados com cinzas volantes, cal ou ambos estão resumidos na Tabela 2.1. Estas investigações geralmente apontam que a inclusão desses materiais pode melhorar a estrutura e características do solo em muitos aspectos, incluindo resistência, rigidez, permeabilidade e compressibilidade.

Tabela 2.1 – Lista de artigos sobre melhoramento de solos com cal e cinza volante

Referencia	Tipo de solo	Agente estabilizante	Testes Geotécnicos executados	Principais Resultados
Al-Mukhtar <i>et al.</i> (2012)	Argila expansiva	Cal (1% a 10%)	Resistência à compressão simples (RCS), expansão, permeabilidade	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A compressão simples (RCS) aumenta em comparação com a amostra não tratada (0,30 MPa) mais de 4 vezes nas amostras tratadas com 4% e 10% de cal após 7 dias de cura e mais de 6 vezes após 90 dias.</li> <li>• A pressão de expansão diminui muito com 4% de cal de 150 kPa para 20 kPa e 15 kPa após 7 dias e 90 dias, respectivamente</li> <li>• A permeabilidade aumenta de 4,10–8 m/s para 600,10–8 m/s com 4% de cal adicionada e depois diminui para 90,10–8 m/s com 10% de cal</li> </ul>

Al-Mukhtar <i>et al.</i> (2014)	Cinco solos argilosos	Cal (10%)	Determinação do consumo de cal por análise química	<ul style="list-style-type: none"> <li>Os resultados demonstram que a reação pozolânica está presente e se desenvolve em todas as amostras de solo argiloso testadas.</li> <li>Esta reação aumenta com a quantidade de cal disponível e é bastante acelerada pelo aumento da temperatura de cura (de 20° para 50°C).</li> <li>Após 6 meses a reação pozolânica está praticamente completa a 20 °C e completa a 50 °C de cura.</li> </ul>
Consoli <i>et al.</i> (2014a)	Argila arenosa de baixa plasticidade (CL)	Cal (3-11%)	RCS	<ul style="list-style-type: none"> <li>A RCS aumentou de forma não linear com o aumento do teor de cal para os tempos de cura estudado (7 a 360 dias), sendo a não linearidade mais claramente notada para períodos de cura mais longos e menores quantidades de cal. Atingindo 3500 kPa para 11% de teor de cal e 360 dias de cura.</li> <li>A relação porosidade/teor de cal (<math>\eta/L_v</math>) ajustada pela aplicação de um expoente ao parâmetro <math>L_v</math> mostrou ser um parâmetro de índice apropriado para avaliar a RCS.</li> </ul>
Dash e Hussain (2012)	Argila expansiva e argila residual não expansiva	Cal (1-13%)	Limites de Atterberg, expansão, RCS	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diminuição imediata do índice de plasticidade com adição de cal, mostrando uma grande diminuição do limite de liquidez para o solo expansivo (de 450 para menos de 200%) e aumento do limite de plasticidade para ambos os solos.</li> <li>após uma redução inicial, expansão aumentou com o aumento da porcentagem de cal ao longo do tempo. Sendo maior para os corpos de prova com maior percentual de solo residual rico em sílica. O tratamento excessivo com cal pode até alterar a própria natureza do solo; por exemplo, com 13% de cal, o solo residual praticamente não expansivo transformou-se num solo moderadamente expansivo.</li> <li>Para solos expansivos, o teor ótimo de cal foi de 9%, enquanto para solos residuais foi reduzido para 5%.</li> <li>Com 9% de cal e 28 dias de cura, a resistência aumentou para 3.000 kPa em comparação com 250 kPa para o solo não tratado, ou um aumento de 12 vezes.</li> </ul>
Ghobadi <i>et al.</i> (2014)	Solo argiloso	cal (1-7%)	RCS	<ul style="list-style-type: none"> <li>A RCS aumenta com o aumento do teor de cal e do tempo de cura. O teor ideal de cal e o tempo de cura adequado para o solo estudado são de</li> </ul>

				<p>pelo menos 7% e 30 dias, respectivamente, com a RCS subindo de 15 kPa para o solo não tratado para 70 kPa para o solo tratado.</p>
Kumar <i>et al.</i> (2020)	Argila expansiva	cal (1-15%)	expansão, RCS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A adição de cal ao solo argiloso aumentou a resistência reduziu a expansão. A expansão do solo passou de 1,6% para 0,4% nas amostras com 12% de cal.</li> <li>• A RCS máxima para três dias de cura foi de 367 kPa e foi alcançada com 12% de teor de cal. Acima deste percentual, a adição de calcário diminui a resistência do solo.</li> </ul>
Tonini <i>et al.</i> (2021)	misturas de bentonita e caolin	cal de casca de ovo e cal mineral (2-4%)	expansão, RCS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A cal de casca de ovo foi mais eficaz na redução da expansão em todas as condições analisadas quando comparada à cal comercial mineral.</li> <li>• O índice ajustado de porosidade/teor de calcário (<math>\eta/L_v^{-0,26}</math>) mostrou-se um parâmetro adequado para avaliar a expansão do solo.</li> </ul>
Mir e Sridharan (2021)	Argila expansiva	Cinza volante (10-80%)	Limites de Atterberg, expansão	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os resultados mostraram que os limites de consistência, as características de compactação e o potencial de expansão das misturas expansivas de solo e cinzas volantes são significativamente modificados e melhorados.</li> <li>• Verifica-se que a quantidade ótima de cinza necessária para minimizar o potencial de expansão, bem como para melhorar as características de plasticidade, está entre 10% e 40%.</li> </ul>
Nath <i>et al.</i> (2021)	Solo orgânico mole	Cinza volante (10-20%)	Limites de Atterberg, RCS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tanto o limite de liquidez como o limite de plasticidade aumentam com o aumento do teor de cinzas volantes.</li> <li>• Há um rápido aumento da RCS com a adição de teor de cinzas de até 15%. Para maiores teores de cinzas, o valor da RCS aumentou gradualmente (de 40 kPa para solo não tratado até 85 kPa com 20% de cinzas volantes e 28 dias de cura).</li> <li>• A RCS também aumenta com o aumento do período de cura.</li> </ul>
Turan <i>et al.</i> (2022)	Solo argiloso com plasticidade intermediária (CI)	Cinza volante classes C e F (0-30%)	compactação, RCS, triaxial consolidado-não drenado, permeabilidade e expansão	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A resistência (<math>c'</math> e <math>\phi'</math>) e permeabilidade do solo estabilizado melhoraram enquanto a expansão diminuiu pela adição de cinzas volantes e pelo aumento do tempo de cura.</li> </ul>

				<ul style="list-style-type: none"> <li>• A RCS do solo aumentou com a adição dos dois tipos de cinza volante e com o tempo de cura. No entanto, quando o teor de cinzas volantes aumentou de 25% para 30%, a RCS do solo estabilizado diminuiu ligeiramente para ambos os tipos de cinzas volantes. Portanto, o teor ideal de cinzas volantes parece ser de 25% para ambos os tipos de cinzas volantes.</li> <li>• As melhorias nos parâmetros de resistência, expansão e permeabilidade do solo estabilizado foram para as misturas com cinzas volantes de classe C do que F. Com uma RCS de 600 kPa e 300 kPa aos 28 dias de cura respectivamente, em comparação com menos de 200 kPa da amostra não tratada.</li> </ul>
Seyrek (2018)	Solo argiloso com alta plasticidade (CH)	Cinza volante (5-30%)	Limites de Atterberg, compactação, expansão, RCS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificou-se que o índice de plasticidade dos solos diminuiu consideravelmente com o aumento adição de cinzas volantes, enquanto a resistência melhorou e o potencial de expansão diminuiu.</li> <li>• Os valores do índice de plasticidade diminuíram para as amostras com até 20% de cinzas volantes e aumentaram após esse teor</li> <li>• O RCS aumentou entre 3 a 5 vezes para 30% de cinzas volantes dependendo do tipo de cinzas volantes em relação ao mesmo solo não tratado.</li> </ul>
Consoli <i>et al.</i> (2014b)	areia fina uniforme (SP)	Cinza volante (25%) e cal (3-7%)	resistência à tração por compressão diametral (RTC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A RTC com 5% de cal e 25% de cinzas volantes variou de 10 kPa em 1 dia de cura até 300 kPa em 28 dias de cura e a 27° C.</li> <li>• A RTC aos 28 dias de cura com 5% de cal e 25% de cinzas volantes variou entre 200 kPa a 20° e 500 kPa a 50° de temperatura de cura.</li> <li>• As maiores melhorias foram observadas nos primeiros 10 dias de cura.</li> <li>• Foi encontrada uma equação para determinar a RTC em função da porosidade (<math>\eta</math>), teor de cal que se mostrou satisfatória para as temperatura e tempos de cura estudados.</li> </ul>
Consoli <i>et al.</i> (2015)	Argila arenosa (SC)	Cinza volante (25%) e cal (3-9%)	RCS, RTC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durante 28 dias de cura a RCS variou de 2.000 a 3.100 kPa para 3% e 9% de teor de cal, respectivamente. E para 90 dias de cura, a RCS variou de 4.000 a 8.000 kPa para 3% e 9% de teor de cal, respectivamente.</li> <li>• Uma metodologia para estabelecer parâmetros de envoltória de ruptura de solos tratados com cinzas</li> </ul>

				volantes e cal, baseada em RCS ( $\sigma_c$ ) e RTC ( $\sigma_t$ ), foi proposta e testada com sucesso.
Deepak <i>et al.</i> (2015)	Solo argiloso	Cinza volante (0-5%) e cal (0-4%)	Limites de Atterberg, RCS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A adição de cinza volante por si só não cria grande impacto na melhoria das características de engenharia do solo.</li> <li>• A adição de cinzas volantes e cal melhoraram a RCS da amostra estabilizada. Com 2% de cal, observou-se um aumento de 60% em comparação com o solo não tratado.</li> <li>• Maior RCS foi alcançado com maiores porcentagens de cal (para os teores estudados).</li> </ul>
Eskisar (2021)	Solo argiloso (MH)	Cinza volante (0-20%) e cal de carboneto (0-20%)	RCS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inicialmente a RCS aumentou significativamente com o aumento do teor de cal até 9% de cal.</li> <li>• Após 9%, o desenvolvimento da resistência abrandou (região de transição). Com a adição de mais cal, o pico de resistência foi alcançado.</li> <li>• Após 13% de teor de cal a RCS começou a diminuir</li> <li>• Aos 28 dias de cura, as amostras com 10% de cal de carboneto e 20% de cinza volante atingiram RCS 8 vezes maior do que o solo não tratado.</li> </ul>
Diallo e Unsever (2019)	Argila com alta plasticidade	Cinza volante (0-30%) e cal (2%)	compactação e RCS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A quantidade que apresentou maior RCS foi de 25% de cinza, após esse valor, houve uma diminuição da RCS.</li> <li>• Após 28 dias de cura, o solo tratado com 25% de cinza e 2% de cal apresentou 38.99 kg/cm<sup>2</sup> de RCS, comparado com 5,10 kg/cm<sup>2</sup> do solo tratado apenas com cal.</li> </ul>

Fonte: elaborado pelo autor.

As propriedades geotécnicas de solos argilosos mudam imediatamente após o tratamento com cal. Esses solos tratados perdem suas propriedades coesivas e se comportam como um material granular: o índice de plasticidade e a pressão de expansão reduzem, enquanto a tensão de compressão não confinada aumenta (Ghobadi *et al.*, 2014; Consoli *et al.*, 2014a; Dash e Hussain, 2012). Todas estas alterações de propriedades têm origem na modificação induzida pelas reações cal-argila na textura e na estrutura do solo argiloso tratado. Estas propriedades também mudam com o tempo de cura, à medida que a modificação na escala microscópica continua com a progressão da lenta reação pozolânica cal-argila (Kumar *et al.*, 2020; Al-Mukhtar *et al.*, 2012). A revisão da literatura sugere que a estabilização do solo com

cal e cinzas volantes tem grande potencial para melhorar as propriedades mecânicas e físicas dos geomateriais. Nos itens a seguir serão discutidas algumas propriedades e suas respectivas mudanças no solo estabilizado.

### 2.5.1 Índice de plasticidade

De acordo com Ingles e Metcalf (1972) um dos benefícios mais notáveis da cal é a capacidade da mesma de alterar a plasticidade do solo. Assim, o aumento da quantidade de cal no processo de estabilização química provoca a redução do índice de plasticidade (Castro-Fresno *et al.*, 2011; Amiralian *et al.*, 2012, Manasseh e Olufemi, 2008; Harichane *et al.*, 2011; Dash e Hussain, 2012).

Tanto o limite liquidez quanto o limite de plasticidade são influenciados pela adição de cal ao solo, que afeta a espessura da dupla camada difusa de água que envolve as partículas de argila. O limite de liquidez de solos argilosos diminui com o aumento do teor de cal (Bell, 1988; Dash e Hussain, 2012), enquanto que o limite de plasticidade geralmente mostra uma tendência a aumentar (Barker *et al.* 2006, Consoli *et al.*, 2014a), sendo que quanto maior a quantidade de argila, maior é o aumento no limite de plasticidade (Hilt e Davidson 1960, Kumar *et al.*, 2020).

Segundo Dash e Hussain (2012), a cal geralmente aumenta o índice de plasticidade de solos de baixa plasticidade e diminui o índice de plasticidade de solos altamente plásticos. Devido à redução da plasticidade dos solos plásticos, pela adição de cal, o solo torna-se mais friável e fácil de manusear no campo. A adição de cal também provoca uma redução na densidade máxima compactada e um aumento no teor ótimo de água de moldagem.

De acordo com Bell (1996) as argilas expansivas reagem rapidamente com a cal devido aos íons de cálcio presentes na cal, os quais causam uma redução na plasticidade, deixando o material mais friável e com maior trabalhabilidade.

Mir e Sridharan (2021) estudaram o efeito das cinzas volantes nas propriedades de engenharia de solos expansivos. Foram estudados parâmetros como plasticidade, compactação, resistência e condutividade hidráulica de solo expansivo para diferentes teores de cinza (10% a 80%). A plasticidade foi reduzida em cerca de 50% pela adição de 20% de cinza volante. a adição das cinzas volantes diminui o índice de plasticidade das amostras de solo. O limite de liquidez (LL) diminui linearmente com o aumento do teor de cinza e o limite de plasticidade

(LP) aumenta até 20% de cinza, mantendo-se relativamente constante para maiores teores de cinza. O solo torna-se não plástico após a adição de cerca de 80% de cinzas volantes.

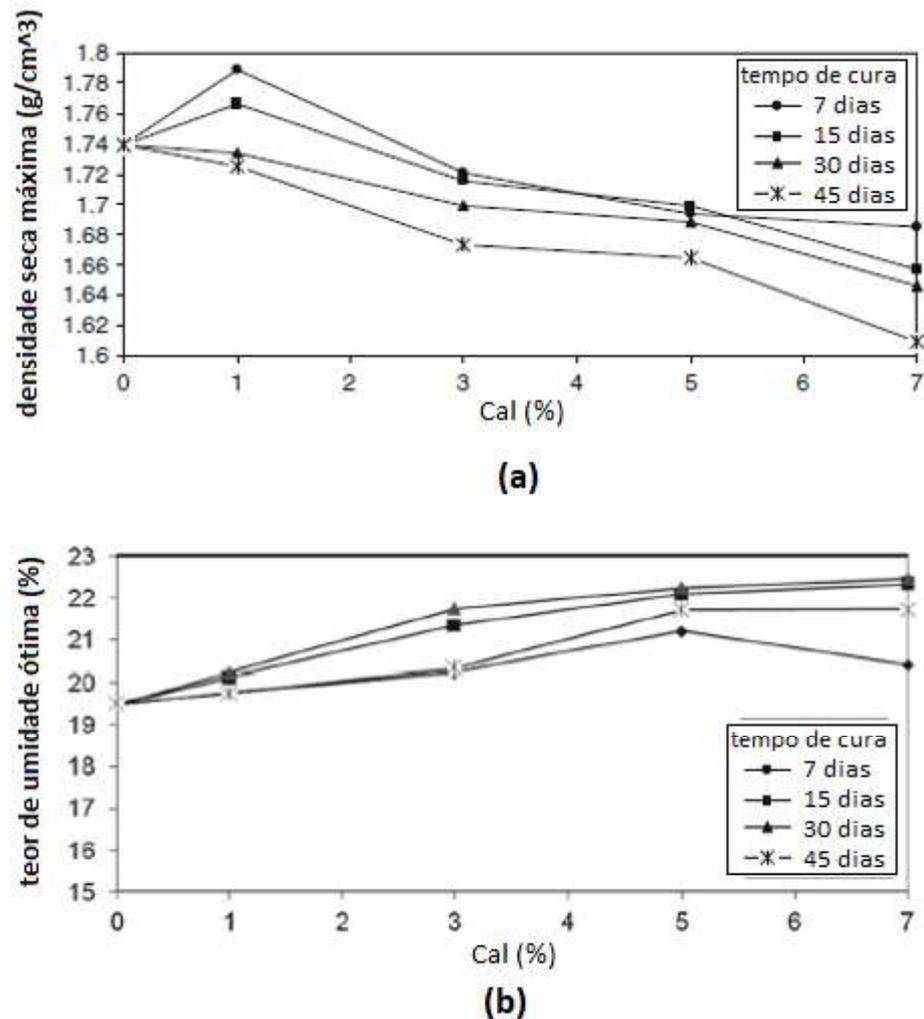
### **2.5.2 Compactação**

Em comparação com o solo não estabilizado, o tratamento com cal não apenas causa um aumento notável no teor de umidade ideal, mas os resultados também indicam uma diminuição na densidade seca máxima após a estabilização com cal, como mostram os resultados obtidos nos estudos de Ghobadi *et al.* (2014), Kavak e Akyarl (2007), Castro-Fresno *et al.* (2011), McCarthy *et al.* (2012), Harichane *et al.* (2009) e Harichane *et al.* (2012).

De acordo com os resultados encontrados por Ghobadi *et al.* (2014), com o aumento do teor de cal, a densidade seca máxima apresenta uma tendência decrescente e uma proporção reduzida dependendo do teor de cal e do tempo de cura. Como pode ser visto na Figura 2.4, o teor de umidade ideal aumenta com o aumento da porcentagem de cal e do tempo de cura. Comportamento semelhante foi observado por outros pesquisadores para solos argilosos estabilizados com cal (Hossain *et al.*, 2007; Bell, 1996; Gay e Schad, 2000).

De acordo com Gray e Lin (1972), o peso específico das cinzas volantes depende de uma variedade de fatores, como graduação, formato das partículas, composição química, etc. Pandian e Mir (2002) e Sridharan *et al.* (2001) relataram que as curvas de compactação de cinzas volantes se assemelham às de solos sem coesão e a mudança no teor de água não tem efeito significativo sobre o peso específico seco. Moulton (1978) relatou que os solos naturais têm 1 a 5% de vazios de ar no peso unitário seco máximo, enquanto o mesmo índice para cinzas volantes é de 5 a 15%. A taxa de vazios mais alta tende a limitar o acúmulo de poropressão durante a compactação e, assim, permite que as cinzas volantes sejam compactadas em uma ampla faixa de teores de água (Sridharan *et al.* 2001). Além disso, as cinzas volantes, sendo um material siltoso e não coesivo, podem ser compactadas eficientemente com rolos de borracha durante a construção.

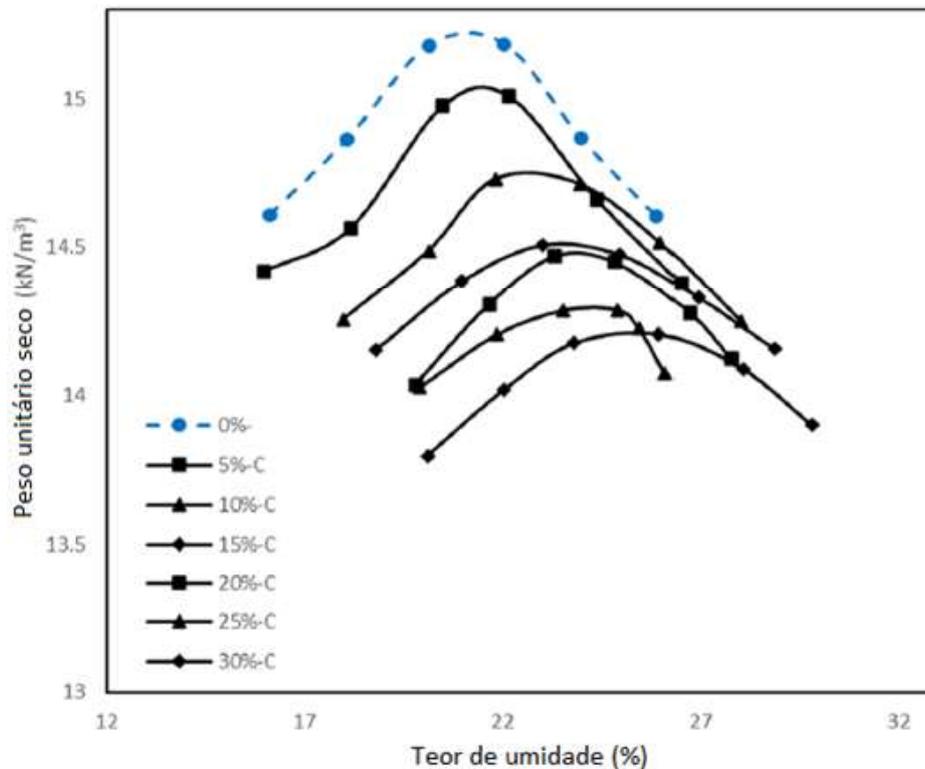
Fig. 2.4 - Efeito do teor de cal na (a) densidade seca máxima e (b) teor de umidade ideal.



Fonte: adaptado de Ghobadi *et al.*, 2014).

Vários pesquisadores conduziram investigações sobre as características de compactação do solo com cinza volante (Degirmenci *et al.*, 2007; Sezer, 2006; Seyrek, 2018; Mir e Sridharan, 2021; Turan *et al.*, 2022). Através da estabilização do solo, as partículas do solo podem atrair maiores quantidades de água. Essa interação leva diretamente a um aumento no teor de umidade ideal e uma diminuição na densidade seca máxima, conforme mostrado por Turan *et al.* (2022) ao adicionar cinza volante classe C à um solo argiloso (caulinita) (Figura 2.5).

Figura 2.5 – Curva de compactação de um solo argiloso com diferentes teores de cinza volante classe C (0 a 30%)



Fonte: adaptado de Turan *et al.* (2022).

### 2.5.3 Expansão

Solos com alta plasticidade geralmente contêm minerais argilosos, como a montmorilonita, que tem grande afinidade com a água. Portanto, tais solos sofrem grande expansão, levando a graves perturbações e danos às estruturas sobrejacentes (Petry e Little 2002). Através de modificações físico-químicas, a cal pode controlar de maneira eficaz a expansão dos solos (Dash e Hussain, 2012).

Al-Mukhtar *et al.* (2012) conduziram testes de RCS, ensaios de expansão e permeabilidade com solo argiloso tratado com 0%, 1%, 4% e 10% de cal com períodos de cura de 7 e de 90 dias. Eles mostraram que os valores de IP diminuem substancialmente com a adição de cal e ligeiramente com o tempo de cura. Aumentos adicionais na cal além de 4% proporcionaram pouco ou nenhum aumento adicional no índice de plasticidade. A redução na plasticidade pode ser atribuída à natureza cada vez mais granular do solo argiloso tratado com cal, induzida pelas reações de curto prazo (troca catiônica e floculação-aglomeração). A pressão de expansão diminuiu bastante com 4% de cal, de 150 kPa para 20 kPa e 15 kPa após 7 dias e

90 dias, respectivamente. Os valores de pressão de expansão para 10% de cal foram semelhantes àqueles para 4% de cal. Este resultado confirma o efeito muito positivo do tratamento da argila plástica estudada utilizando apenas 4% de cal.

Ainda de acordo com Al-Mukhtar *et al.* (2012), a permeabilidade do solo estudado aumentou de  $4 \times 10^{-8}$  m/s para  $600 \times 10^{-8}$  m/s com 4% de cal e diminuiu para  $90 \times 10^{-8}$  m/s com 10% de cal. Este comportamento pode ser atribuído à natureza cada vez mais granular e aos poros conectados do solo tratado, induzidos pelas reações imediatas da cal com a argila. A adição de mais cal (> 4%) parece preencher a porosidade da amostra e reduzir a sua permeabilidade. Com o tempo de cura, a permeabilidade diminuiu à medida que a reação cal/argila modifica a distribuição do tamanho dos poros por cimentação e preenchimento de alguns poros. Mudanças na textura, no tamanho dos poros e na acessibilidade dos poros aumentam a tortuosidade, o que leva à uma redução na permeabilidade. Além disso, os resultados comprovam mais uma vez a importante alteração induzida no solo tratado com 4% de cal.

Tonini *et al.* (2021) mostraram que tanto a cal mineral como a cal da casca de ovo reduziram o potencial expansivo do solo estudado, sendo que a cal de casca de ovo apresentou resultados ainda maiores que a cal comercial para os mesmos teores.

#### **2.5.4 Resistência**

De acordo com Schnaid *et al.*, 2001, existe um entendimento geral que, para uma dada variação de tensões, a resistência ao cisalhamento de solos naturalmente e artificialmente cimentados pode ser representada por uma envoltória reta de Mohr-Coulomb, definida por um intercepto coesivo, que é apenas função da cimentação, e por um ângulo de atrito que parece não ser afetado pela cimentação.

Segundo Consoli *et al.* (2015), o principal efeito da cal na resistência ao cisalhamento de um solo fino reativo é o de produzir um substancial aumento da coesão; sendo o aumento do ângulo de atrito bem menos expressivo. Considerando as baixas tensões confinantes atuantes no interior de pavimentos flexíveis ou fundações superficiais, o aumento da coesão é de maior importância (Thomé, 1994).

Thomé (1994), ao estabilizar um solo argiloso com 5%, 7% e 9% de cal obteve valores de coesão e ângulo de atrito, compreendidos entre 13,7 kPa e 21,6 kPa, e 19,7° e 23,1° respectivamente. O solo natural tinha  $c' = 6,1$  kPa e  $\phi' = 18,3^\circ$ .

Consoli *et al.* (2001), ao verificar o comportamento de um solo silte-arenoso tratado com 4% de cal de carbureto, observaram um acréscimo na coesão de 10 kN/m<sup>2</sup> para 42kN/m<sup>2</sup> e um acréscimo no ângulo de atrito de 35° para 38°, em relação ao solo natural.

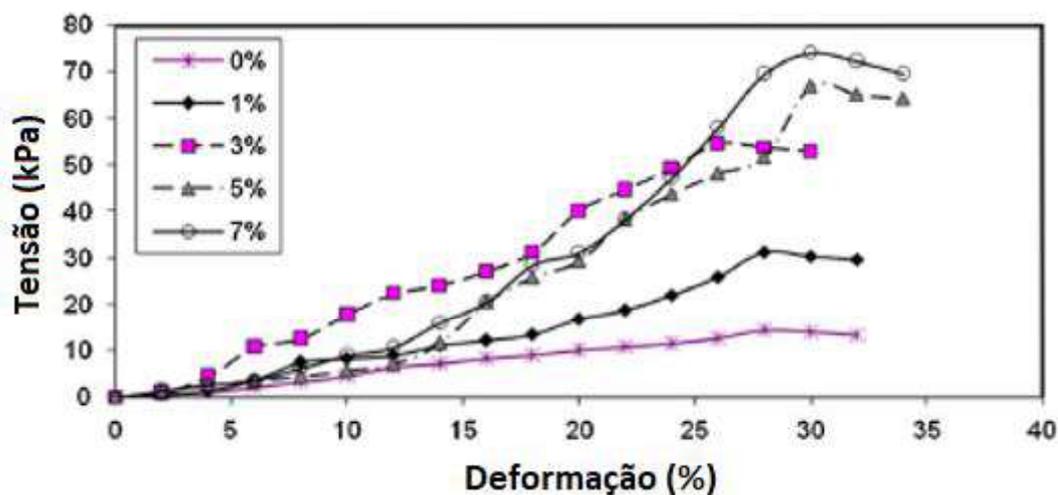
Consoli *et al.* (2014a) conduziram ensaios de RCS em um solo arenoso de baixa plasticidade (CL de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos, SUCS) para 5 teores de cal entre 3% e 11% com uma combinação de diferentes tempos de cura (28, 90 e 360 dias) e 3 porosidades (peso unitário seco de 16,0, 17,0 e 18,0 kN/m<sup>3</sup>). Os resultados mostraram que o teor de cal tem um efeito importante na resistência da argila arenosa tratada com cal. Também mostraram que a resistência à compressão não confinada aumenta de forma linear com o aumento do teor de cal para todos os períodos de cura estudados. Além disso, a resistência à compressão simples do solo pode ser aumentada em quase cinco vezes pela adição de pelo menos 7% de cal após um tempo de cura de 30 dias.

Diversos estudos (Castro-Fresno *et al.*, 2011; Amiralian *et al.*, 2012, Manasseh e Olufemi, 2008; Harichane *et al.*, 2011; Dash e Hussain, 2012) mostram que a resistência à compressão não confinada (RCS) do solo tratado aumenta com a adição de cal e o tempo de cura. Porém, essas alterações são insignificantes nas amostras testadas com 1%.

No solo argiloso estudado por Al-Mukhtar *et al.* (2012), a RCS aumenta mais de 4 vezes nas amostras tratadas com 4% e 10% de cal após 7 dias de cura e mais de 6 vezes após 90 dias em comparação com a amostra não tratada.

Ghobadi *et al.* (2014) estudaram um solo argiloso, usando 5 teores de cal (entre 0% e 7%) e 4 tempos de cura (7, 15, 30 e 45 dias), os resultados do ensaio de compressão simples mostraram que as curvas tensão-deformação dos solos não tratados apresentam uma deformação contínua até que um estado estacionário seja alcançado (Fig. 2.6). Isto está de acordo com o comportamento de solos normalmente consolidados, que não apresentam picos de tensão-deformação pronunciados. A Figura 2.6 também mostra que as curvas tensão-deformação dos solos tratados com cal exibem picos graduais pronunciados, dependendo da porcentagem de cal e do tempo de cura, que são atribuídos à cimentação de partículas do solo devido às reações pozolânicas mencionadas anteriormente.

Figura 2.6 - Curvas tensão-deformação de solos argilosos tratados com cal (0 a 7%) para 30 dias de cura



Fonte: adaptado de Ghobadi *et al.* (2014).

Thompson (1975) constatou que o quociente entre a resistência à tração e a resistência à compressão simples ( $q_u/q_t$ ) das misturas solo-cal estudadas varia de 0,10 a 0,15, independentemente do tipo e/ou teor de cal. Além disso, Ceratti (1979), ao estudar os efeitos da adição de cal e cinza volante a um solo residual compactado, também constatou uma relação entre 0,10 e 0,13. Bordignon (2015), ao estudar uma areia argilosa com 3%, 6%, 8% e 16% de cal para 7, 14, 28 e 56 dias de cura, obtve relações  $q_u/q_t$  entre 0,125 e 0,250, sendo menor a diferença entre as resistências para os tempos de cura maiores.

Segundo TRB (1987) e Thompson (1969), a resistência à tração por compressão diametral conduz a menores valores que a resistência à tração na flexão. Eles demonstraram que o quociente entre a resistência à tração na flexão e a resistência à tração na compressão diametral é em torno de 2. Assim pode-se estimar que a resistência à tração na flexão é 25% da resistência à compressão simples.

Turan *et al.* (2022) estudaram os efeitos de cinzas volante classe C e F em solo argiloso. Os experimentos incluíram compactação, resistência à compressão não confinada, testes de consolidação unidimensional, triaxial consolidado-não drenado em amostras de solo argiloso estabilizado com cinza volante após 1, 7 e 28 dias de cura. Os testes foram realizados em misturas de argila com cinza volante classe C ou classe F, variando de 0% a 30% do solo. Os valores do ângulo efetivo de resistência ao cisalhamento ( $\phi'$ ) e coesão efetiva ( $c'$ ) para as

misturas com 15% e 25% de cinzas para ambas as classes, assim como para o solo sem tratamento são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento de amostras de solo controle e estabilizadas com cinza volante por 28 dias de cura

Teor de cinza volante (%)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
0%	19,0	18,4
15% classe C	86,6	22,5
25% classe C	99,1	24,0
15% classe F	11,1	22,3
25% classe F	15,1	22,4

Fonte: adaptado de Turan et al., (2022)

Os resultados indicam que o valor de  $c'$  (coesão efetiva) aumentou com a adição de cinza volante classe C. Para o solo estabilizado com cinza volante classe C, o aumento de  $c'$  é significativo com o aumento dos tempos de cura. Por outro lado, a coesão do solo estabilizado com cinza volante classe F é inferior ao solo sem cinza. Quando a cinza volante sem coesão se mistura com a argila, a estrutura do solo da argila muda, levando à diminuição da coesão. No entanto, como a cinza volante classe C possui cal, as reações pozolânicas entre a cal, as cinzas volantes e a argila têm um efeito significativo na melhoria da coesão, mesmo que as cinzas volantes não tenham coesão.

Os valores do ângulo efetivo de resistência ao cisalhamento melhoraram com a adição dos dois tipos de cinza volante. No entanto, as cinzas volantes de classe C foram mais pronunciadas em comparação com as cinzas volantes de classe F na melhoria do ângulo efetivo de resistência ao cisalhamento devido à sua natureza química (Turan *et al.*, 2022). De acordo com Bryson *et al.* (2017), o aumento de  $\phi'$  está relacionado à substituição de partículas. A característica siltosa da cinza volante diminuiu a fração argila e aumentou o tamanho médio de grão da mistura. Isso contribuiu para melhorar o ângulo de resistência ao cisalhamento. Além disso, o valor de  $\phi'$  das amostras de solo estabilizadas aumentou com o aumento do tempo de cura. Isso ocorre porque as propriedades pozolânicas das cinzas volantes tornam-se mais pronunciadas com a cura. Sezer *et al.* (2006) também indicaram que a perda de umidade de uma amostra durante a cura pode causar um aumento no valor de  $\phi'$ .

## 2.6 VARIÁVEIS DETERMINANTES DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS SOLO-CINZA-CAL

As mudanças no solo estabilizado com cal e cinza volante depende de vários fatores, tais como o tipo de solo, de cal e de cinza, os teores dos aditivos, o período e a temperatura de cura, e é um problema complexo que necessita de uma avaliação cuidadosa.

Consoli *et al.* (2014b) mostrou que para a resistência à compressão simples (RCS), a resposta das variáveis determinantes mais importantes vai seguir a tendência apresentada na Tabela 2.3. Neste item, cada variável será discutida em maior detalhe.

Tabela 2.3: Efeitos das variáveis na resistência à compressão simples (RCS)

<b>Variável</b>	<b>Efeito</b>
<b>Tipo de solo</b>	Quanto maior a fração argilosa, maior o ganho de resistência
<b>Tipo de cal</b>	Quanto maior o teor de CaO da cal, maior o ganho de resistência
<b>Tipo de cinza</b>	Cinzas que apresentem materiais com propriedades pozolânicas e CaO (classe C) são auto-cimentantes. Mas adição de cal aumenta a resistência para ambas as classes de cinza volante.
<b>Teor de cal</b>	Quanto maior o teor, maior o ganho de resistência, até um certo valor (geralmente entre 7% a 11%)
<b>Teor de cinza</b>	Quanto maior o teor, maior o ganho de resistência, até um certo valor (geralmente entre 20% a 25%)
<b>Tempo e temperatura de cura</b>	Quanto maior o tempo e a temperatura de cura, mais reações pozolânicas irão ocorrer, o que aumentará a resistência do solo
<b>Porosidade</b>	A redução na porosidade aumenta consideravelmente a resistência do solo estabilizado

Fonte: elaborado pelo autor.

### 2.6.1 Solo

Qualquer que seja a composição mineralógica do solo argiloso, o tratamento com cal na presença de água induz a formação de hidratos de cálcio compostos por diferentes proporções de cálcio, alumínio e silício resultantes da destruição dos argilominerais.

Al-Mukhtar *et al.* (2014) monitoraram o consumo de cal de cinco solos argilosos tratados com 10% de cal e observaram que a cinética do tratamento com cal depende, além da quantidade de cal disponível e da temperatura de cura, da natureza mineralógica e

cristalográfica do argilomineral. Os resultados demonstram que a reação pozolânica está presente e se desenvolve em todas as amostras de solo argiloso testadas, porém, a taxas diferentes para cada tipo de argila, sendo relativamente rápidas com a esmectita, lentas com a illita e ainda mais lentas com a caulinita.

Bell (1996) constatou através de ensaios de resistência à compressão simples que, para um solo com predominância de montmorilonita, a resistência máxima foi atingida com 4% de cal, enquanto que para um solo com predominância de caulinita, a resistência máxima foi atingida com teores na faixa de 4 e 6 %, sendo que a melhoria foi mais significativa neste último.

Dash e Hussain (2012) compararam o comportamento de duas argilas, uma de alta plasticidade (solo expansivo, bentonita) e uma com baixa plasticidade (solo residual não expansivo, caolinita, quartzo e magnetita). Ambos os solos apresentaram diminuição do limite de liquidez com aumento do teor de cal. Esta redução foi máxima para o solo expansivo e diminuiu gradualmente com o aumento do teor de solo residual.

De maneira geral, quanto maior a plasticidade, maior a reatividade dos solos a cal, aumentando sua resistência e trabalhabilidade e diminuindo a expansão volumétrica (USACE, 1994).

A cal tem pouco efeito em solos altamente orgânicos e também em solos com pouca ou nenhuma quantidade de argila. Sendo mais eficiente em solos argilosos, podendo ser mais efetivo que o cimento em pedregulhos argilosos (Ingles e Metcalf, 1972).

Para solos orgânicos, espera-se que as reações sejam inibidas ou retardadas pela existência de compostos orgânicos (Hampton e Edil 1998; Tremblay *et al.* 2002).

### **2.6.2 Cal mineral**

Conforme Guimarães (2002), a cal utilizada na estabilização ou melhoria dos solos é produto resultante da calcinação, em temperaturas próximas de 1000°C, de rochas carbonatadas cálcicas e magnesianas existentes na superfície terrestre. Na forma hidratada deve obedecer às determinações da Norma Brasileira NBR 7175/2003. Ainda de acordo com o autor, há uma predominância de rochas dolomíticas para a produção de cal no sul do Brasil.

Na Tabela 2.4 são apresentadas as propriedades com valores médios das cales comercializadas no mercado brasileiro, segundo Guimarães (2002).

Tabela 2.4 – Composição média das cales brasileiras

TIPO DE CAL	CaO (%)	MgO (%)	Insolúvel no HCl (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Perda ao Fogo (%)	CO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	CaO + MgO Base de Não-Volátil (%)	MgO Não Hidratado (%)
CAL VIRGEM CÁLCICA	90–98	0,1–0,8	0,5–3,5	0,2–1,0	0,5–5,0	0,2–3,8	0,1–0,6	96,0–98,5	–
CAL HIDRATADA CÁLCICA	70–74	0,1–1,4	0,5–2,5	0,2–0,8	23–27	1,5–3,5	0,1–0,0		0,5–1,8
CAL HIDRATADA DOLOMÍTICA OU MAGNESIANA	39–61	15–30	0,5–18,2	0,2–1,5	19–27	3,0–6,0	0,02–0,2	76–99	5 – 25
CAL VIRGEM DOLOMÍTICA OU MAGNESIANA	51–61	30–37	0,5–4,5	0,2–1,0	0,5–4,8	0,5–4,5	0,05–0,1		–

Fonte: adaptado de Guimarães (2002).

Ormsby e Kinter (1973) constataram, para um solo contendo como principal argilo-mineral a caulinita, que a mistura com cal cálcica apresentou maior resistência à compressão simples que a mistura com cal dolomítica. Quando o principal argilo-mineral presente era a montmorilonita, a cal dolomítica apresentou desempenho um pouco superior. Segundo Bhattacharja *et al.* (2003), independentemente da fonte de cálcio utilizada, é necessário que uma quantidade equivalente de cálcio seja disponibilizada para as reações pozolânicas. Na cal dolomítica a presença de magnésio reduz a disponibilidade de cálcio por peso unitário, o que poderia ser compensado pela dosagem de um maior teor de cal.

### 2.6.3 Cal de casca de ovo

Segundo a Embrapa (2019), a produção de ovos no Brasil foi de 44,5 bilhões de unidades em 2018. Considerando que o peso médio da casca de um ovo é de 6,6g (Beck *et al.*, 2010), conclui-se que a quantidade de cascas produzidas anualmente chega a 294 mil toneladas (Favretto, 2020).

Os ovos das aves consistem em casca (material protegido biomineralizado), membrana da casca, albúmen (branco) e vitelo (gema). A casca do ovo é constituída por uma estrutura de três camadas: cutícula, camada esponjosa e camada lamelar. A camada de cutícula representa a superfície mais externa composta principalmente por proteínas. Camadas esponjosas e lamelares formam uma matriz constituída por fibras proteicas ligadas a cristais de carbonato de

cálcio. A casca do ovo é geralmente composta por 94% em massa de carbonato de cálcio, 1% em massa de fosfato de cálcio, 1% em massa de carbonato de magnésio e 4% em peso de matéria orgânica (Rivera *et al.*, 1999). Entre a casca e o albúmen existem duas membranas finas de casca de ovo constituídas principalmente por colágeno, alcinos, alcanos, amins e amidas de proteínas e ácidos carboxílicos (Park *et al.*, 2016). O resíduo da casca do ovo é composto pelas três camadas e pelas duas membranas (Boron 2004).

A casca do ovo é considerada um resíduo de difícil disposição final, porém, por ser rica em carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), pode substituir o calcário (uma fonte não renovável) como fonte de óxido de cálcio na produção da cal (Boron 2004; Oliveira *et al.* 2013). O resíduo calcinado de casca de ovo de galinha, como fonte de óxido de cálcio, tem sido estudado para algumas aplicações: catalisador na produção de biodiesel (Viriya-Empikul *et al.*, 2010), síntese verde (Mosaddegh e Hassankhani, 2014), sorvente de  $\text{CO}_2$  (Sacia *et al.*, 2013), argamassa à base de casca de ovo (Beck *et al.*, 2010), composto de polietileno (Jirimali *et al.*, 2018), estabilização de solos e rejeitos (Favretto, 2020; Tonini *et al.*, 2021) e muitos outros (Tan *et al.*, 2017; Nagabhushana *et al.*, 2017).

De acordo com Ferraz *et al.* (2018), a utilização de resíduos de casca de ovo em um processo industrial de produção de cal possibilita algumas oportunidades: (i) valorização de resíduos de casca de ovo na indústria da construção, que de outra forma seriam comumente descartados em aterros; (ii) racionalização da exploração do calcário natural, através da incorporação de uma pequena quantidade de resíduos de casca de ovo no processo; e (iii) provavelmente o mais importante, uma perspectiva interessante no contexto da economia circular associada às vantagens econômicas, ambientais e sociais.

Assim como no calcário, através do processo de calcinação, a casca de ovo ( $\text{CaCO}_3$ ) libera o gás carbono ( $\text{CO}_2$ ) e torna-se cal viva ( $\text{CaO}$ ), que pode ser hidratada para a produção de cal hidratada [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ]. A temperatura ideal de calcinação é a mesma do calcário, em torno de  $1000^\circ\text{C}$ , podendo alcançar pureza de 97%, maior do que a cal comercial (Beck, 2010). Temperaturas muito abaixo desse valor podem não decompor o carbonato de cálcio e temperaturas muito altas diminuem a reatividade da cal (Zaman *et al.*, 2018).

Ferraz *et al.*, (2018) realizaram estudos de caracterização físico-química da cal hidratada proveniente das cascas de ovos e do calcário (cal mineral cálcica), através de ensaios de difração por raios-X. Na tabela 2.5 são apresentadas as composições químicas da casca de ovo, do calcário e dos respectivos produtos formados: cal de casca de ovo e cal de calcário.

Observa-se que ambas são constituídas primariamente e apresentam teores muito próximos de CaO, 81,7% para a cal de calcário e 76,7% para a cal de casca de ovo, sendo o óxido de magnésio (MgO) o segundo material mais abundante, 1,3% para a cal de casca de ovo e 0,9% para a cal de calcário. De acordo com os resultados encontrados, foi possível mostrar que a cal de calcário e a cal de casca de ovo possuem composição muito similares.

Tabela 2.5 - Dados dos ensaios de difração por raios-X (principais elementos) das matérias-primas e cal de casca de ovo e calcário

Amostra	CaO (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MnO (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	LOI (%)
Calcário	55,25	0,38	0,04	0,01	0,20	0,12	0,06	nd	nd	0,01	0,06	43,88
Casca do ovo	53,51	0,66	0,12	0,03	0,02	0,01	nd	nd	nd	0,30	0,55	44,79
Cal de calcário	81,73	1,25	0,09	0,04	0,22	0,11	0,17	nd	nd	0,01	0,16	16,24
Cal de casca do ovo	76,77	0,86	0,10	0,03	0,07	0,02	nd	nd	nd	0,33	0,18	21,65

Fonte: adaptado de Ferraz *et al.* (2018)

Tonini *et al.* (2021) compararam a resistência à compressão simples (RCS) e o módulo de cisalhamento inicial de misturas solo-cal para um solo argiloso com teores de 0% a 6% de cal de casca de ovo e cal mineral dolomítica. Observaram que as amostras contendo cal de casca de ovo apresentaram maior RCS e rigidez em comparação com as amostras de cal mineral, para os mesmos teores, comprovando a maior eficácia da cal de casca de ovo para a melhoria do solo. Para 2% de cal mineral as misturas não apresentaram rigidez suficiente e o módulo de cisalhamento inicial não pode ser medido. Por outro lado, 2% de cal de casca de ovo resultou em amostras com maior rigidez do que misturas contendo 4% de cal mineral. Além disso, as misturas com 4% de cal de casca adquiriram RCS superior a 0,34 MPa após 7 dias de cura. De acordo com Christopher *et al.* (2006), esta é a resistência mínima exigida para um subleito melhorado com cal após 28 dias de cura, atestando a viabilidade da técnica de melhoria proposta não só para o desenvolvimento de resistência, mas também de rigidez.

#### 2.6.4 Cinza volante

Em um contexto industrial, existem três tipos de cinzas produzidas durante a combustão do carvão: cinzas volantes (também chamadas de cinzas leves), cinzas de fundo (ou cinzas pesadas) e cinzas de lagoa (Ghosh, 2010). A cinza volante é separada dos gases de

combustão nas caldeiras e depois recolhidos por precipitadores mecânicos ou eletrostáticos ou separadores de ciclone e sacos filtrantes (Kim e Prezzi, 2008, Ghosh, 2010, Ramadas *et al.*, 2011, Sezer, 2006.). As cinzas de fundo são preparadas a partir das cinzas encontradas no fundo do forno. Enquanto que as cinzas de lagoa são produzidas a partir de uma mistura de cinzas volantes e cinzas de fundo armazenadas em uma lagoa de cinzas e é produzida em quantidade maior que as outras duas (Ghosh, 2010).

As cinzas volantes são divididas em classe C e classe F, de acordo com a especificação da Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM-C618), com base no tipo de carvão queimado e no teor de CaO (Kim e Prezzi, 2008; Degirmenci *et al.*, 2007, Senol, 2006). As cinzas volantes classe C são obtidas a partir da queima de carvões de alta qualidade, ricos em carbono, as cinzas volantes de classe C contêm altos níveis de óxidos de cálcio (CaO) e silicatos (ACAA, 2021) e apresentam alta reatividade em presença de água e em temperatura ambiente. As cinzas volantes classe F são derivadas de carvões com menor teor de carbono e maiores proporções de sílica, alumina e ferro, as cinzas volantes de classe F apresentam uma reatividade química menor em comparação com as de classe C (ACAA, 2021).

Embora possa haver múltiplas variações, as partículas de cinzas volantes geralmente consistem em esferas ocas de óxidos de silício, alumínio e ferro e carbono não oxidado, com propriedades pozolânicas.

A eficiência de uma determinada cinza volante como agente de estabilização de solo depende da abundância relativa de CaO e óxidos pozolânicos. Segundo Tastan *et al.* (2011), as cinzas volantes classe C contêm, além de pozolanas, como  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$ , cal em sua composição e, portanto, são auto cimentantes. Turan *et al.* (2022), Nath *et al.* (2021) e Mir e Sridharan (2021) provaram que as cinzas volantes de classe C podem ser utilizadas de forma eficaz na estabilização de solos argilosos. As cinzas volantes de classe F podem ser usadas com outros aditivos, como cal ou ativadores alcalinos, para obter propriedades mecânicas mais altas em solos argilosos, uma vez que não são um material auto cimentante

### **2.6.5 Teores de cal e cinza**

Lopes Junior (2007), Lopes Junior (2011), Dalla Rosa (2009) e Consoli *et al.* (2016c) ao estudarem misturas solo-cal, observaram que o aumento da quantidade de cal provoca um aumento da sua resistência à compressão simples. Também observaram que o aumento do peso específico aparente seco provoca o aumento da sua resistência à compressão simples.

Consoli *et al.* (2001), ao estudarem um solo arenoso tratado com cinza volante e cal de carbureto, verificaram que para uma mesma tensão confinante, o aumento da quantidade de cal provoca aumento da resistência de pico e diminuição da deformação na qual o pico é atingido.

Consoli *et al.* (2014b) observaram que mesmo um pequeno aumento no teor de cal é suficiente para gerar um ganho significativo na resistência à tração. Por exemplo, um aumento no teor de cal de 3% para 5% produziu um aumento de 50% na RTC.

Segundo Ingles e Metcalf (1972), geralmente, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com a quantidade de cal até certo nível.

Dash e Hussain (2012) realizaram ensaios de limite de Atterberg, expansão e RCS usando dois tipos extremos de solos argilosos: um solo expansivo rico em montmorilonita e um solo não-expansivo rico em sílica, tratados com teores de 1 a 13% de cal para tempos de cura de até 28 dias. Para cada tipo de solo, foi encontrado um teor ótimo de cal além do qual a melhoria da resistência diminuiu, 9% e de teor cal para o solo expansivo e 5% para o solo não-expansivo.

O limite de liquidez dos solos diminui inicialmente com o aumento do teor de cal. Contudo, além de aproximadamente 5% de teor de cal, os limites de consistência não mudam mais, indicando que a trabalhabilidade dos solos não pode ser melhorada ainda mais (Dash e Hussain, 2012).

Correspondentemente, o potencial de expansão dos solos diminui inicialmente com o aumento da percentagem de cal para um valor praticamente insignificante, além do qual aumenta novamente à medida que o teor de cal aumenta. O teor de cal no qual a expansão começa a aumentar é de aproximadamente 5% para solos de granulação fina e de aproximadamente 9% para solos de granulação grossa (Dash e Hussain, 2012).

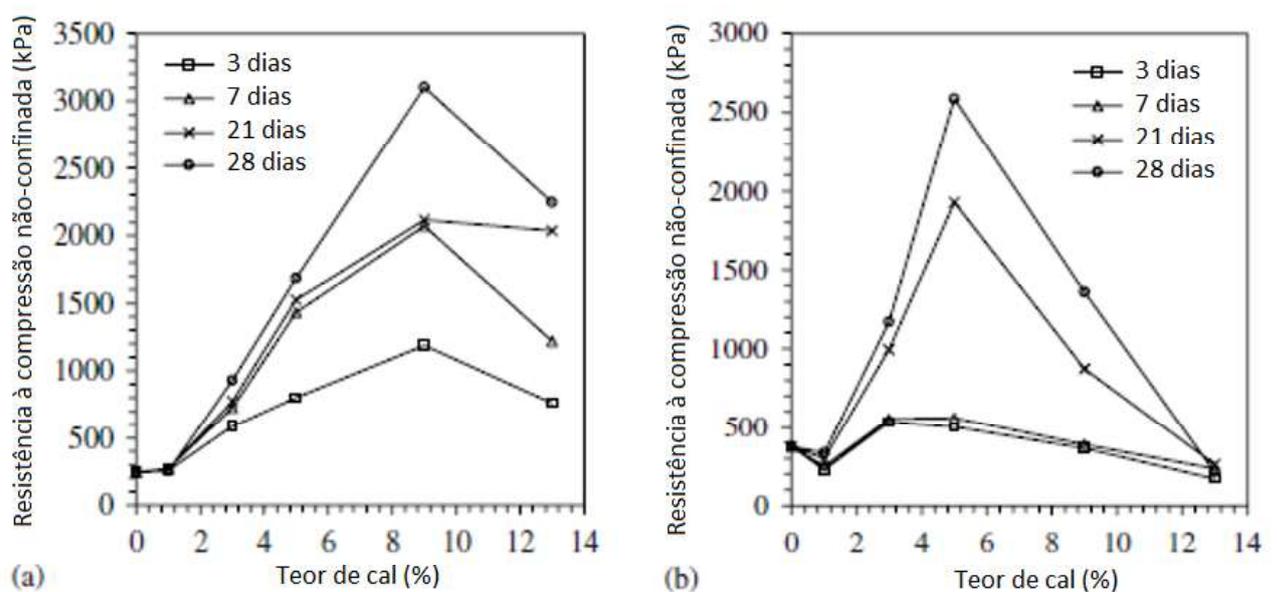
Segundo Al-Mukhtar *et al.* (2012), a cal em quantidades muito pequenas, aproximadamente 1%, não causa melhorias significantes a resistência do solo, mesmo se curada durante um longo período. Nesta fase, a cal é utilizada principalmente para atender às necessidades iniciais do solo, como alterar sua dupla camada difusa indicada pela diminuição do limite de liquidez. Portanto, a cimentação é muito fraca, dando origem a um ganho marginal de resistência. Com o aumento do teor de cal, a reação pozolânica atinge o pico, produzindo

quantidades adequadas de compostos cimentícios que resultam em aumentos visíveis de resistência.

De acordo com os resultados de Dash e Hussain (2012) apresentados na figura 2.7, com 9% de cal e 28 dias de cura, a resistência aumenta para 3.000 kPa em comparação com 250 kPa para o solo não tratado, ou seja, resultando num aumento de 12 vezes. Contudo, com aumentos adicionais de cal, ocorre uma redução na resistência que é mais pronunciada em curas prolongadas.

Bell (1996) recomendou que, como a cal não tem atrito nem coesão apreciáveis, uma quantidade excessiva serve como lubrificante para as partículas do solo e, portanto, diminui a resistência. Kumar *et al.* (2007) atribuíram tal redução de resistência ao formato platinado das partículas de cal que não reagiram. Porém, como já foi explicado anteriormente, a cal produz um gel cimentício que apresenta volume substancial de poros ao reagir com o solo. Portanto, com o aumento do teor de cal, a estrutura do solo tende a ser cada vez mais porosa para contrabalançar o ganho de resistência atribuível à cimentação. Com um teor de cal muito elevado, ocorre uma diminuição geral na resistência devido à formação excessiva deste material de gel. Este efeito é mais proeminente para solos não-expansivos, tanto que com 13% de cal, o solo corrigido tem um desempenho inferior ao solo não tratado [Fig 2.7 (b)].

Figura 2.7. Variação na resistência à compressão simples com o teor de cal em (a) solo expansivo, (b) solo não-expansivo.

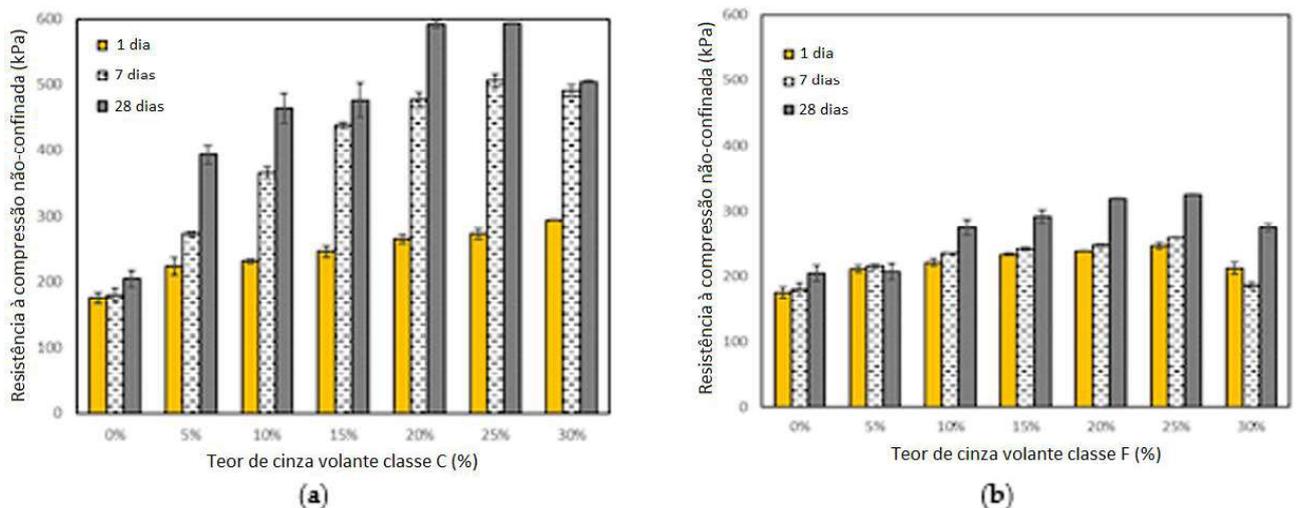


Fonte: Adaptado de Dash e Hussain (2012)

A determinação de uma dosagem eficiente de cal para a estabilização do solo é um tema que vem sendo estudado por muitos pesquisadores. A razão para a importância da dosagem certa está, além das considerações econômicas, em sua capacidade de produzir o efeito oposto ao desejado.

Turan *et al.* (2022) realizaram ensaios de compactação, resistência à compressão não confinada e triaxial consolidado não drenado em um solo argiloso estabilizado com cinza volante classe C e classe F, variando de 0% a 30% (Figura 2.8). Os resultados mostraram que, assim como para os solos tratados com cal, as misturas de cinza também apresentam um teor ótimo, que para o solo estudado foi de 20% a 25%, a partir desse valor, houve uma queda na resistência do solo estabilizado para ambas as classes de cinza.

Figura 2.8. Efeitos do teor de cinzas volantes (a) classe C e (b) classe F na resistência à compressão não confinada com 1 dia, 7 dias e 28 dias de cura.



Fonte: adaptado Turan *et al.*, (2022)

Diallo e Unsever (2019) investigaram o efeito da cinza (teores de 0 a 30%) e 2% de cal a um solo argiloso de alta plasticidade. A Figura 2.9 apresenta a RCS para três tempos de cura com os diferentes teores de cinza. Descobriu-se que a adição de cal e cinzas volantes ao solo argiloso em diferentes porcentagens aumenta a resistência da argila de alta plasticidade em proporções variadas. O solo que apresentou maior resistência à compressão foi o melhorado com 25 % de cinza, após esse valor, houve uma diminuição da RCS. Após 28 dias de cura, o solo tratado com 25% de cinza (e 2% de cal) apresentou RCS de 39,0 kg/cm<sup>2</sup>, comparado com 5,1 kg/cm<sup>2</sup> do solo tratado apenas com cal.

Figura 2.9 – RCS de três tempos de cura para 2% de cal (C) e diferentes teores de cinza volante (CV) (0% a 30%)



Fonte: adaptado de Diallo e Unsever (2019).

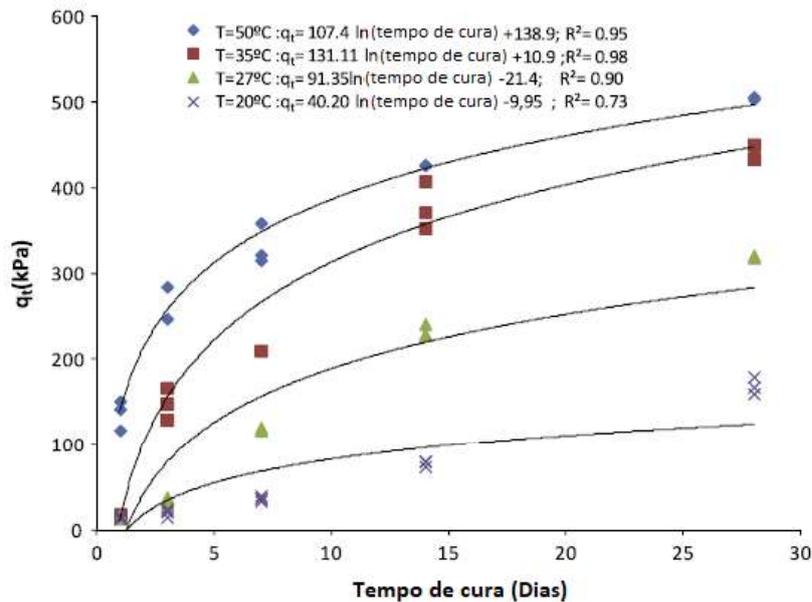
### 2.6.6 Efeito do tempo e temperatura de cura

Al-Mukhtar *et al.* (2012) mostraram que a RCS aumenta com a adição de cal e o tempo de cura. A RCS aumenta em comparação com a amostra não tratada (0,30 MPa) mais de 4 vezes nas amostras tratadas com 4% e 10% de cal após 7 dias de cura e mais de 6 vezes após 90 dias. A reação pozolânica é ativada pela presença de cal consecutivamente às reações de curta duração. O aumento do RCS com o tempo de cura é devido ao desenvolvimento de ligações cimentícias produzidas pela reação pozolânica. Os resultados demonstram que a reação pozolânica é bastante acelerada pelo aumento da temperatura de cura por tratar-se de uma reação endotérmica. Para todos os solos estudados, a reação pozolânica estava praticamente completa após 6 meses de cura, a 20 °C.

Consoli *et al.* (2014b) verificaram que a RCS e a RTC aumentam com o aumento da temperatura e do tempo de cura, conforme apresentado na Figura 2.10. As tendências logarítmicas são mostradas como curvas de melhor ajuste para todas as temperaturas. O gradiente inicial das curvas aumenta com o aumento da temperatura, mostrando que altas temperaturas (como 50 °C) têm respostas mais rápidas no que diz respeito ao ganho de resistência à tração em curtos períodos de tempo. Por exemplo, aumentar a temperatura de 20 °C para 35 °C durante um período de cura de três dias (para misturas com teor de cal de 5% e peso unitário seco de 15 kN/m<sup>3</sup>) aumenta a resistência à tração por ruptura de aproximadamente 20 kPa para aproximadamente 150 kPa.

De acordo com Al-Mukhtar *et al.* (2014), a eficácia do tratamento com cal a longo prazo é determinada pela reatividade da reação pozolânica e pelas diferentes quantidades de cal que não são consumidas pelos argilominerais no curto prazo.

Figura 2.10 – Resistência à tração pelo tempo de cura de um solo tratado com 5% de cal para diferentes temperaturas

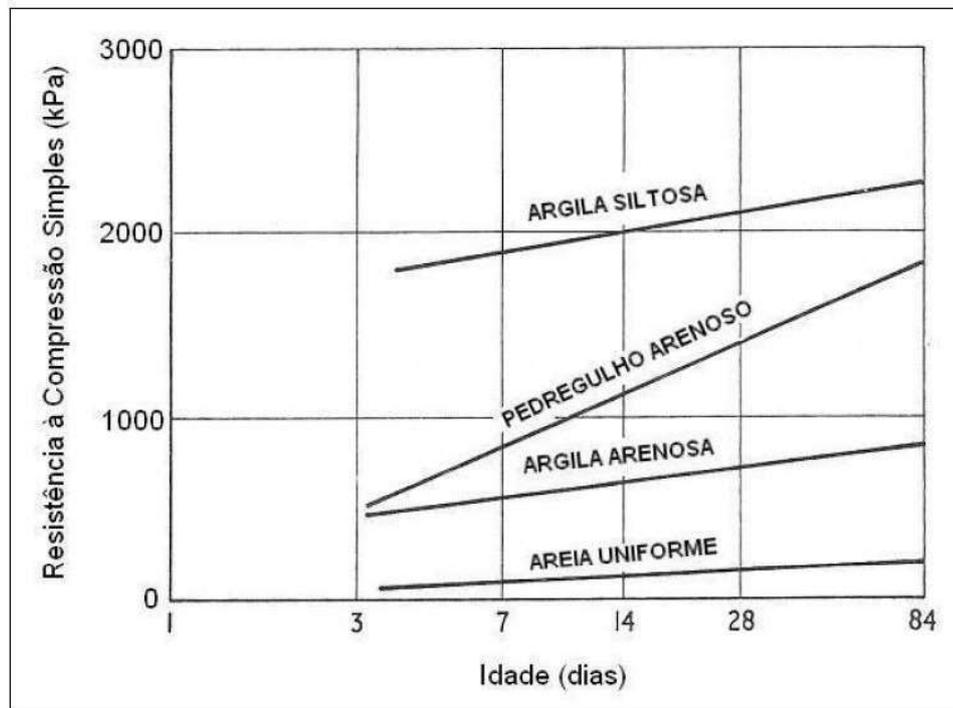


Fonte: adaptado de Consoli *et al.* (2014b)

Ingles e Metcalf (1972) apresentaram um estudo sobre a influência do tempo de cura em diferentes tipos de solos, tratados com 5% de cal hidratada, observando as taxas de ganhos de resistência maiores em pedregulhos arenosos, conforme mostrado na Figura 2.11.

Lopes Junior (2007) verificou que misturas de solo residual de arenito Botucatu com 25% de rocha basáltica pulverizada, tratadas com 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cal, com 90 dias de cura apresentaram resistências 50% superiores em relação às amostras com 28 dias de cura.

Figura 2.11 – efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal



Fonte: adaptado de Ingles e Metcalf (1972).

### 2.6.7 Efeito do teor de umidade e da relação água/cal

Consoli *et al.* (2014a) mostraram que, diferentemente do que acontece com o concreto, onde a quantidade de água reflete a quantidade de vazios na argamassa, a relação água/cimento, nos solos estabilizados com cal não existe uma relação única entre os vazios e a quantidade de água, pois os vazios são apenas parcialmente preenchidos com água.

Lopes Junior (2007) estudou misturas de solo residual de arenito Botucatu com 25% de rocha basáltica pulverizada, tratadas com 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cal. Nessas misturas utilizou-se 10%, 12%, 14% e 16% de umidade de moldagem. Os resultados mostraram que a variação de umidade de moldagem não afetou a resistência à compressão simples para os tempos de cura (28 dias e 90 dias). Verificou-se não existir relação entre a resistência à compressão simples e a relação água/cal. Segundo o autor, para o solo estudado, a relação água/cal não é a melhor maneira de prever a resistência em solos no estado não-saturado. Em solos tratados com cal, Ingles e Metcalf (1972) afirmam que a água somente é necessária para transportar os íons de cálcio e hidroxila para a superfície da argila para que ocorram as reações

químicas e que o teor ótimo de água obtido pelo ensaio de compactação é suficiente para efetivar este processo.

Segundo Larnach (1960), como a compactação em solos ou no solo-cal-cinza não consegue expulsar completamente o ar do sistema solo-água-ar ou solo-cal-cinza-água-ar, a resistência não pode ser correlacionada com o fator água/cimento, pois este só se aplica a materiais onde o ar foi totalmente expulso e os vazios existentes estão preenchidos por água, como no caso de argamassas e concretos tradicionais.

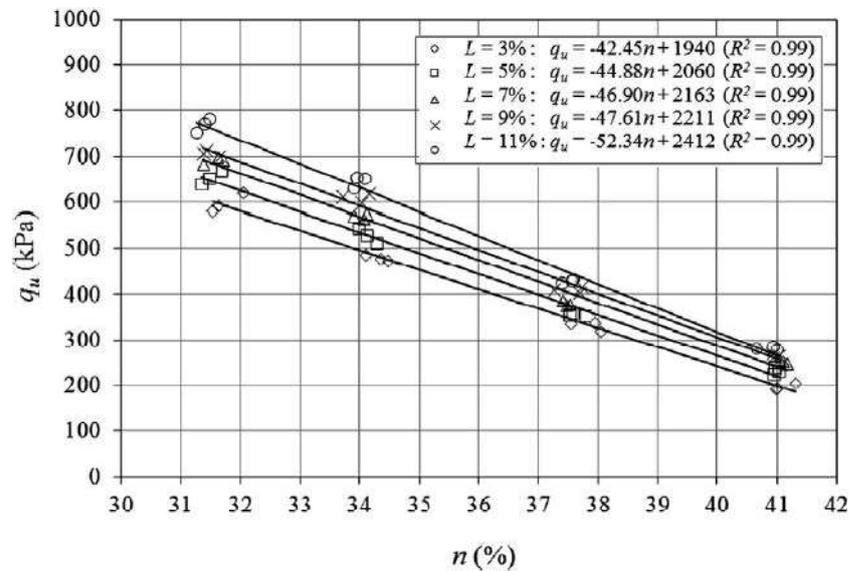
### **2.6.8 Efeito da densidade e porosidade**

De similar importância à quantidade de cal é a densidade na qual a mistura é compactada. Com o aumento da densidade, a resistência aumenta, a permeabilidade diminui até um valor mínimo, próximo da umidade ótima, e depois começa a aumentar novamente (Ingles e Metcalf, 1972).

A resistência à compressão não confinada aumenta linearmente com a redução da porosidade da mistura compactada. Este efeito benéfico de uma diminuição na porosidade foi relatado anteriormente por vários pesquisadores (por exemplo, Ingles e Metcalf, 1972; Consoli *et al.*, 2006, Consoli *et al.*, 2007). À medida que a quantidade de vazios na mistura solo-cinza volante-cal é reduzida, as partículas do material ficam mais próximas, aumentando o número de contatos e, conseqüentemente, a resistência tanto à tração por compressão como por compressão simples.

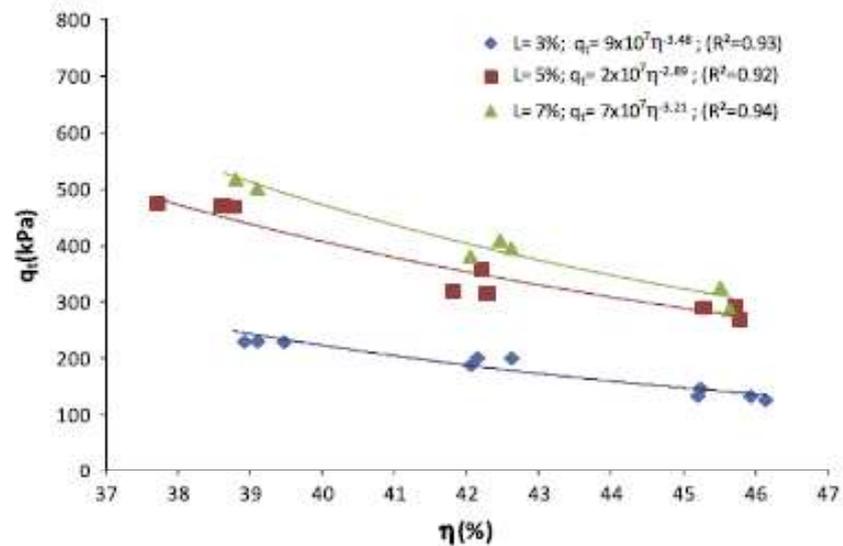
Consoli *et al.* (2014a), Consoli *et al.* (2014b) e Consoli *et al.* (2015) mostraram que tanto a resistência RCS quanto a RTC aumentaram aproximadamente de forma linear com a redução da porosidade do solo estabilizado, como mostra a figura 2.12 e 2.13.

Figura 2.12 - Variação da RCS ( $q_u$ ) pela porosidade ( $\eta$ ) para diferentes teores de cal (3%, 5%, 7%, 9% e 11%) e 28 dias de cura



Fonte: Consoli *et al.* (2014a),

Figura 2.13 - Variação da RTC ( $q_t$ ) pela porosidade ( $\eta$ ) para diferentes teores de cal (3%, 5% e 7%) e 28 dias de cura



Fonte: adaptado de Consoli *et al.* (2014b)

### 2.6.9 Dosagem da cal

A dosagem tem por objetivo determinar a quantidade de cal a ser adicionada ao solo que fornecerá a resistência e a durabilidade adequadas ao uso em projeto e é realizado através de testes de laboratório (Ingles & Metcalf, 1972).

Entre os métodos de dosagem de misturas solo-cal mais utilizados destacam-se:

– Método do pH (Eades & Grim, 1966) – O teor de cal utilizado é aquele que produza um pH de 12,4 na mistura;

– Método do ICL (*Initial Consumption of Lime*) – uma variação do método do pH, proposto por Rogers *et al.* (1997), no qual o teor mínimo de cal é aquele onde o pH atinge um valor constante máximo;

– Método de Thompson (1966) – que define solo reativo o solo que, quando estabilizado com cal, apresente um aumento de resistência à compressão simples  $\geq 345$  kPa.

O método do pH apresenta algumas limitações para utilização em solos tropicais e subtropicais. Segundo relato do TRB (1987), estudos de Harty (1970) demonstraram que a porcentagem de cal obtida pelo método do pH, não produz a máxima resistência à compressão nos solos tropicais e subtropicais. Conforme o autor, o método não assegura se a reação do solo com a cal produzirá um substancial aumento de resistência, devendo ser utilizado apenas como referência.

Nunez (1991), ao estudar um solo saprolítico de arenito, observou a impropriedade do método do pH para o solo em questão. Thomé (1994), ao tratar um solo argiloso com cal, verificou que o método Eades e Grim (1966) não se apresentou adequado a determinação do teor ótimo de cal.

Segundo Bhattacharja *et al.* (2003), os métodos de dosagem existentes geralmente consideram a resistência como um critério secundário e não levam em consideração a durabilidade. Caberia destacar que nenhum dos métodos é 100% confiável aos efeitos de avaliar a durabilidade da mistura solo-cal, portanto existe uma necessidade de dosagem experimental em campo para estes casos.

A título de ilustração, a Tabela 2.6 apresenta um indicativo da quantidade de cal a ser adicionada para a estabilização de acordo com o tipo de solo.

Tabela 2.6 – Previsão da quantidade de cal em função do tipo de solo

<b>Tipo de Solo</b>	<b>Teor de Cal para Modificação (%)</b>	<b>Teor de Cal para Estabilização (%)</b>
Pedra finamente britada	2 a 4	Não recomendado
Pedregulho argiloso bem graduado	1 a 3	$\geq 3$
Areias	Não recomendado	Não recomendado
Argila arenosa	Não recomendado	$\geq 5$
Argila siltosa	1 a 3	2 a 4
Argilas	1 a 3	3 a 8
Solos orgânicos	Não recomendado	Não recomendado

Fonte: adaptada de Ingles & Metcalf (1972)

### **2.6.10 Relação porosidade/volume de cal e tempo de cura na resistência à compressão simples**

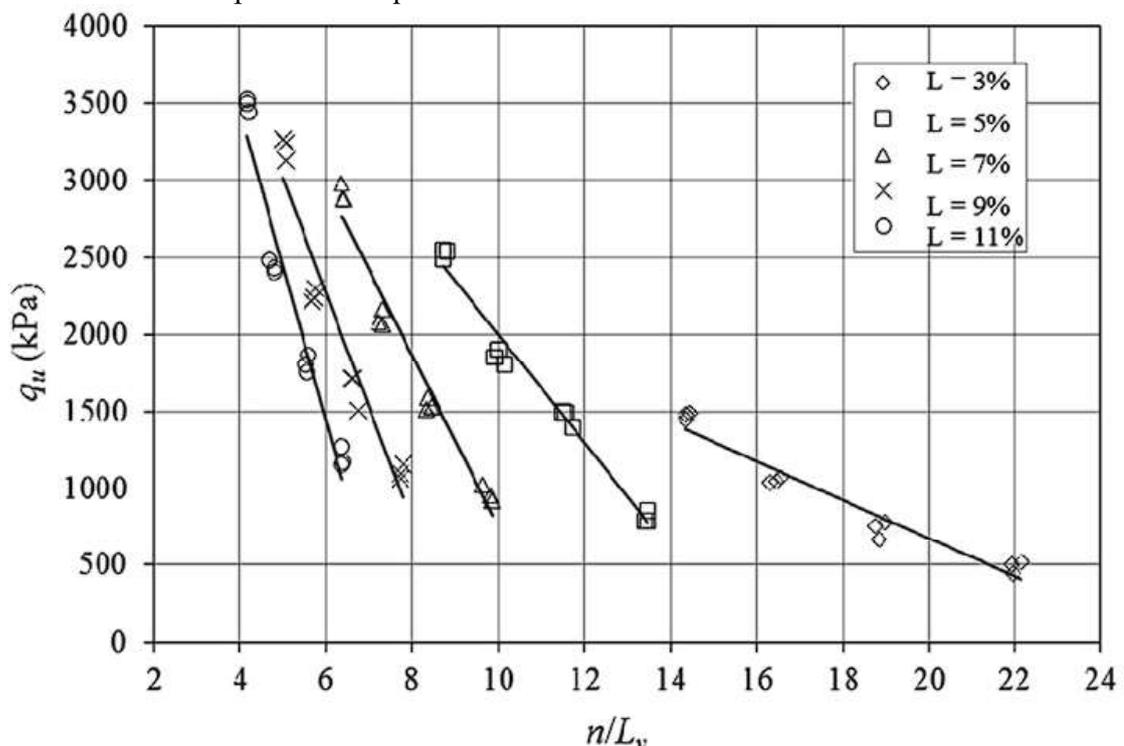
Várias metodologias foram estabelecidas nas últimas décadas (por exemplo, Hilt e Davidson, 1960; Eades e Grim, 1966; Rogers *et al.*, 1997) a fim de determinar a quantidade adequada de cal necessária para modificar as características do solo e introduzir resistência e durabilidade adequadas. Tais metodologias geralmente pretendem estabelecer um valor limite, supostamente para satisfazer quimicamente a demanda de cal do solo, que tem sido frequentemente sugerido como o conteúdo inicial a ser adotado para fins de conveniência de construção. Apesar das inúmeras aplicações, não existem metodologias de cálculo de misturas para a avaliação de uma determinada resistência alvo de solos tratados com cal, com base em critérios racionais como os disponíveis no caso da tecnologia do concreto, onde a relação água/cimento desempenha um papel fundamental. A necessidade de tais metodologias resulta do fato de os solos tratados com cal compactados apresentarem um comportamento complexo que é afetado por múltiplos fatores, tais como as propriedades físico-químicas do solo, porosidade, teor de cal, teor de água de compactação e tempo de cura (por exemplo, Mitchell, 1981; Transportation Research Board, 1987; Brown, 1996; Consoli *et al.*, 2001; Consoli *et al.*,

2008; Consoli *et al.*, 2014a; Ghosh, 2010; Tang *et al.*, 2011; Verbrugge *et al.*, 2011; Dash e Hussein, 2012).

Recentes pesquisas relatam o uso da relação volume de vazios/volume de cal na previsão do comportamento mecânico dos solos estabilizados. Algumas dessas pesquisas incluem estudos realizados por Foppa (2018), Lopes Junior (2020), Consoli *et al.* (2022), Marques (2023), entre outros.

Consoli *et al.* (2014a), Consoli *et al.* (2014b) e Consoli *et al.* (2015) mostraram que uma função de potência se ajusta bem à relação entre as resistências à compressão simples (RCS) e a tração (RTC) e à porosidade ( $\eta$ ) para certa faixa de teor de cal, temperatura de cura e teor de cinzas volantes (Figura 2.14). Dessa forma, Consoli *et al.* (2011) desenvolveram uma metodologia de dosagem para a avaliação da RCS ou da RTC alvo de solo-cinza volante-cal, onde a relação porosidade/cal ( $\eta/L_v$ ) desempenha um papel fundamental.

Figura 2.14 - Variação da resistência à compressão simples com relação porosidade/quantidade de cal aos 360 dias de cura



Fonte: Consoli *et al.*, 2011.

Logo, segundo Consoli *et al.* (2014), a relação porosidade/cal ( $\eta/L_v$ ) ajustada pela aplicação de um expoente ao parâmetro  $L_v$  mostrou-se um parâmetro de índice apropriado para avaliar o RCS e RTC. Ao dividir a porosidade pelo teor volumétrico de cal, um aumento na porosidade poderia ser contrabalançado por um aumento proporcional no teor volumétrico de

cal, mantendo inalterada a resistência à compressão não confinada. Na verdade, para manter o mesmo valor da resistência ( $q_u$ ), poderia ser aplicado uma potência a uma das duas variáveis,  $\eta$  ou  $L_v$ , para compatibilizar os efeitos da sua variação sobre a resistência ( $q_u$ ). Portanto, desconsiderando o efeito do teor de água de moldagem, é possível avaliar a resistência à compressão não confinada de uma determinada mistura solo-cal mistura solo-cal-cinza ou escolher a quantidade de cal e o esforço de compactação apropriados para projetar uma mistura que atenda à resistência exigida pelo projeto com o custo ideal utilizando uma relação porosidade/cal ajustada a um expoente.

O expoente empírico aplicado a  $L_v$  controla a contribuição relativa do teor volumétrico de agente cimentante e da porosidade para a resistência à compressão não confinada. Evidências experimentais apresentadas em trabalhos anteriores (Consoli *et al.*, 2011; Rios *et al.*, 2013), para diferentes tipos de solos, sugerem que este expoente é afetado principalmente pela gradação do solo e que não é maior que um, o que significa que a porosidade produz um efeito maior do que a cimentação na resposta do material.

Consoli *et al.* (2016c) propõe, para solos melhorados argilosos com cal, a aplicação de uma potência igual a 0,12 sobre o parâmetro  $L_v$ , o que proporcionaria uma melhor compatibilização entres as taxas de variação, resultando num melhor ajuste para o fator  $\eta/L_v$ .

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental que compõe a presente dissertação foi estruturado com o objetivo de analisar o comportamento de resistência a compressão simples de diferentes misturas de um solo argiloso melhorado com cal de casca de ovo, cal comercial e cinza volante, assim como comparar o ganho de resistência (RCS) do solo com a adição de cal de casca de ovo com a cal comercial, nas mesmas proporções.

O programa experimental foi executado em três etapas. A primeira etapa consistiu na preparação dos materiais e produção da cal de casca de ovo. Na segunda etapa foram realizados os ensaios de caracterização física do solo, da cinza volante e das cales e os ensaios de dosagem das cales, com o objetivo de classificar e determinar as propriedades dos materiais para definição das misturas avaliadas.

A terceira etapa consistiu na realização de uma série de ensaios de compressão simples, usando os corpos de prova moldados de acordo com o programa de ensaios detalhado no item 3.2. Esta etapa teve por objetivo avaliar a influência isolada de cada uma das variáveis investigadas sobre a resistência à compressão do solo-cal ou do solo-cinza-cal em estudo.

A Tabela 3 apresenta detalhes da segunda e terceira etapas do programa experimental, informando o tipo e número de ensaios que serão realizados em cada etapa. Para atingir o objetivo do trabalho e a análise dos resultados, considerando as variáveis que afetam a RCS do solo estabilizado com cal e cinza volante, os seguintes parâmetros-chave foram selecionados, sendo que os mesmos serão discutidos nos próximos itens do trabalho:

- a) Solo escolhido: solo residual de granito de Florianópolis
- b) Tipos de aditivo: cal de casca de ovo hidratada, cal comercial mineral e cinza volante da termelétrica Jorge Lacerda;
- c) Teor de cal: três teores, sendo 3%, 5% e 7 % em relação à massa de solo seco para cada uma das cales;
- d) Teor de cinza volante: três teores, sendo 0% (apenas solo-cal), 12,5% e 25,0% em relação à massa de solo seco;
- e) Tempo e temperatura de cura: 28 dias;
- f) Peso específico: três valores de  $\gamma_d$  (1,48, 1,58 e 1,68 g/cm<sup>3</sup>)\*

\*para efeito de simplificação, as densidades serão referidas de foram arredondadas para 1,5, 1,6 e 1,7 g/cm<sup>3</sup>.

Considerando a combinação dos dois tipos de cal e três teores (3%, 5% e 7%), três teores de cinza (0%, 12,5% e 25%) e três pesos específicos (1,5, 1,6 e 1,7 g/cm<sup>3</sup>), foram avaliadas as RCS de 54 misturas diferentes, com triplicata de corpos de prova, conforme apresentado na Tabela 3.1.

Nos itens 3.1 e 3.2, são apresentados os materiais e métodos utilizados durante o programa experimental, a justificativa para a escolha dos mesmos, sua descrição e as referências às normas técnicas pertinentes. No item 3.3 encontra-se detalhada a etapa principal deste trabalho que foi a realização dos ensaios de compressão simples.

Tabela 3.1 – Etapas e Ensaio do Programa Experimental

<b>Etapa</b>	<b>Material</b>	<b>Tipo de Ensaio</b>	<b>Número de ensaios</b>	
Ensaio de Caracterização	Solo	Massa Específica Real dos Grãos	1	
		Análise Granulométrica	1	
		Limite de Plasticidade	1	
		Limite de Liquidez	1	
		Compactação (solo e solo+25% de cinza volante)	2	
	Cinza Volante	Massa Específica Real dos Grãos	1	
		Análise Granulométrica	1	
		Limite de Plasticidade	1	
		Limite de Liquidez	1	
	Cal de Ovo e Cal Dolomítica	Massa Específica	2	
		Análise Granulométrica	2	
		Solo-Cinza Volante	Compactação	1
	Dosagem Cal	Solo-Cal	Método Rogers <i>et al.</i> (Método do ICL - 1997)	2
	Resistência Mecânica	Solo-Cal e Solo-Cinza-Cal	Compressão simples	162

fonte: elaborado pelo autor

### 3.1 MATERIAIS

Neste tópico serão detalhados os materiais que serão utilizados nesta pesquisa.

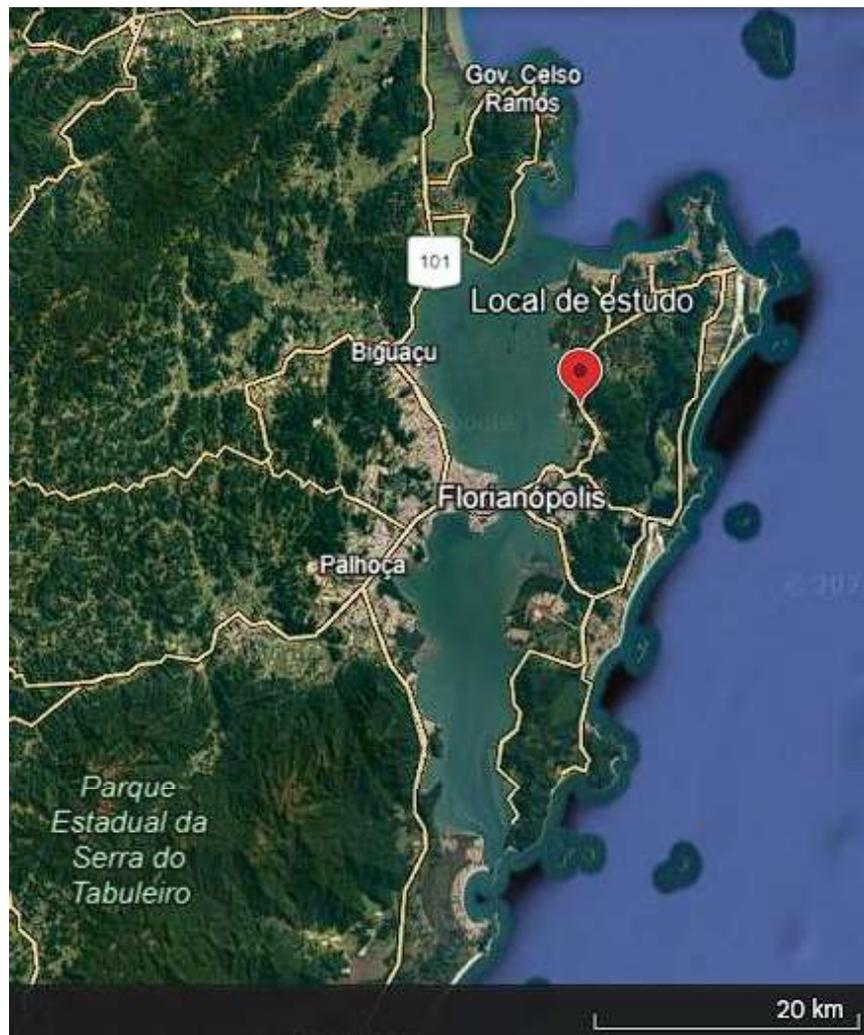
#### 3.1.1 Solo

O local de coleta do material de estudo está indicado na Figura 3.1. A região encontra-se na rodovia SC-401, que liga o centro de Florianópolis ao norte da ilha de Santa Catarina, no bairro Cacupé. O local de coleta está situado nas seguintes coordenadas: Latitude 27°32'2,70"S e Longitude 48°30'42,86"O e é constituído pelo domínio geológico Granito Ilha, cortado por diques de diabásio (Florianópolis, 2020).

A escolha da área de estudo foi motivada pelo tipo de solo do local, histórico de um deslizamento ocorrido em 23 de dezembro de 2008, que interditou a rodovia SC-401, a rodovia estadual mais movimentada do estado e principal via de acesso à região norte do município de Florianópolis e que resultou na morte de uma pessoa, e existência de estudos anteriores envolvendo esta região (Pecapedra, 2016; Nunes, 2017; Pedroso, 2019).

De acordo com Santos (1997), a unidade geotécnica presente na área em estudo é PVg, associada a um solo Podzólico Vermelho-Amarelo Tb (i.e., argila de baixa atividade) com Podzólico Vermelho-Escuro, com textura média e média argilosa Tb, substrato granito e com relevo fortemente ondulado. A geologia de Florianópolis é constituída por duas formações básicas: terrenos rochosos, chamados cristalinos, e terrenos sedimentares, denominadas planícies costeiras. As rochas cristalinas incluem a suíte intrusiva Pedras Grandes, a Formação Serra Geral e a Formação Cambirela (Florianópolis, 2009). A suíte intrusiva Pedras Grandes, também denominado Granito Ilha, constitui, segundo Caruso Jr. (1993), a maior parte rochosa da ilha, ocupando aproximadamente 90% da sua ocorrência. Esse granito apresenta granulometria média a grosseira, sendo constituído, mineralogicamente, por quartzo, biotita, k-feldspato e plagioclásio. O Granito Ilha apresenta geomorfologia constituída por morros altos com encostas íngremes, com afloramento de matacões.

Figura 3.1 - Localização da área de estudo.



Fonte: GoogleEarth (2024).

O solo coletado para o estudo foi material representativo do horizonte C do solo residual granítico (aproximadamente 1,5m de profundidade). A Figura 3.2 apresenta a posição do local estudado, ao lado do viaduto do contorno viário e o local onde ocorreu o deslizamento, no quilômetro 6 da rodovia SC-401, ambos localizados no bairro Cacupé.

Figura 3.2 – Local do deslizamento (deslizamento) e posição da amostragem do solo estudado (Solo)



Fonte: Google Earth (2024)

A coleta do solo foi manual, com o auxílio de pá e enxada, e transportado para o laboratório em sacos plásticos. A Figura 3.5 apresenta o corte de onde foram extraídas as amostras deformadas do solo residual de granito.

A análise tátil-visual do solo residual de granito, apresentado na Figura 3.3, indica tratar-se de um horizonte C pela presença de grãos de feldspatos brancos (cálcicos ou sódicos) que ainda não foram intemperizados, resultando em uma tonalidade mais clara do solo, aliado a aparentes estruturas herdadas da rocha de origem.

Figura 3.3 - Amostragem do solo residual de granito.



Fonte: autor.

### 3.1.2 Cal dolomítica

A cal utilizada no trabalho é uma cal hidratada dolomítica, comercialmente chamada de “Primor Extra”, produzida na cidade de Caçapava do Sul - RS. A Tabela 3.2 apresenta os resultados de ensaios de caracterização da cal utilizada, fornecida pelo fabricante, comparando com as exigências da NBR 7175.

Os ensaios de massa específica da cal seguiram as recomendações da NBR NM 23/2001. Obteve-se, a partir de três determinações o valor médio de 2,57 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 3.2 – Caracterização da cal utilizada

Propriedades	Limites da NBR 7175	Análise
Densidade	600 g/l	510 g/l
Perda ao Fogo	-	23,3%
Resíduo Insolúvel	-	4,7%
CO <sub>2</sub> (anidrido carbônico)	5%	2,2%
Óxidos Totais	88%	94,8%
Óxidos não Hidratados	15%	11%
CaO	-	44,8%
MgO	-	27,9%
Umidade	1,5%	0,6%
Resíduo na peneira 0,600 mm	0,5%	0,0%
Resíduo na peneira 0,075 mm	15%	8,0%

Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.1.3 Cal de casca de ovo hidratada

A cal da casca de ovo utilizada nos ensaios foi fabricada a partir da calcinação da casca de ovo, conforme procedimento que será detalhado no item 3.2.2, na sequência do trabalho.

### 3.1.4 Cinza volante

O resíduo utilizado nesta pesquisa é a cinza volante proveniente do processo da queima do carvão mineral em usinas termelétricas.

A cinza volante utilizada nesta pesquisa é oriunda da Usina Termelétrica Jorge Lacerda (Figura 3.4), a qual pertence à Companhia Diamante Geração de Energia, localizada no município de Capivari de Baixo no sudeste do Estado de Santa Catarina. A termelétrica utiliza carvão mineral na sua operação, e a cinza leve resultante desse processo possui textura fina e coloração cinza claro, além de possuir propriedades pozolânicas (Figura 3.5).

Figura 3.4 – Usina Termelétrica Jorge Lacerda – SC



Fonte: autor

Figura 3.5 – Cinza volante da Usina Jorge Lacerda – SC



Fonte: autor

### **3.1.5 Água**

A água potável é considerada satisfatória para utilização em misturas de solo-cal. Em geral, a quantidade de água a ser adicionada é determinada pela quantidade requerida para a compactação, tomando-se cuidado em misturas com cal virgem, as quais podem requerer maiores teores de água devido ao rápido processo de hidratação (Ingles & Metcalf, 1972).

A água utilizada para a moldagem dos corpos-de-prova e para os ensaios será a água potável proveniente da rede de abastecimento pública destilada no laboratório.

## **3.2 MÉTODOS**

Neste item são apresentados os métodos utilizados, a justificativa para a escolha dos mesmos, sua descrição, bem como referências às normas técnicas obedecidas.

### **3.2.1 Coleta dos materiais utilizados**

Considerando os quatro materiais utilizados na presente pesquisa: solo, cal dolomítica, cal de casca de ovo e cinza volante de termelétrica, o único que precisou ser produzindo a partir da matéria prima foi a cal da casca de ovo. A amostra de solo foi coletada no estado deformado através de escavação com ferramenta manual e em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios previstos, sendo tomado os devidos cuidados para evitar a contaminação do solo coletado. A amostra obtida foi armazenada e transportada em sacos plásticos adequadamente vedados.

A cinza volante foi fornecida pela termelétrica em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios previstos. A amostra assim obtida foi armazenada e transportada em sacos plásticos adequadamente vedados.

A cal comercial foi adquirida em uma loja de materiais para construção.

As cascas de ovos foram coletadas de uma padaria durante um mês. Elas eram retiradas diariamente, lavadas para retirar a película que envolve as cascas e restos de gema e clara, secas a temperatura ambiente e guardadas em sacos plásticos. A casca de ovo nessa condição não apresentou odor.

### 3.2.2 Produção de cal hidratada a partir da casca do ovo

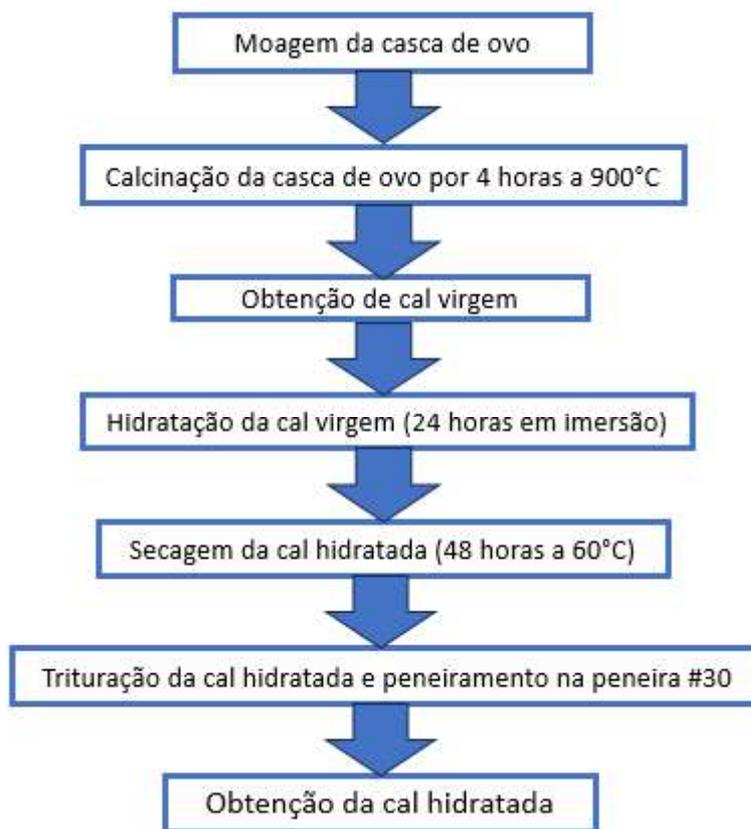
A produção de cal derivada da casca de ovo foi obtida através de um processo padronizado baseado no trabalho de Acosta (2021), que envolveu a calcinação da casca de ovo ( $\text{CaCO}_3$ ) para produção de cal virgem ( $\text{CaO}$ ) e sua posterior hidratação para obtenção de cal hidratada [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ]. Conforme estabelecido no item 2.2.1, as cascas de ovos foram inicialmente submetidas a um tratamento de limpeza e moagem, obtendo-se granulometria inferior a 3,2 mm, onde 90% do material apresentava diâmetro inferior a 1,65 mm.

Para preparar o pó de casca de ovo, primeiramente as cascas foram secas em estufa a  $105^\circ\text{C}$  por 24 horas e, em seguida, trituradas em moinhos de bolas. Quatro quilos de casca eram triturados com 40 bolas por 20 minutos.

Após a trituração, o pó da casca de ovo ( $\text{CaCO}_3$ ) era colocado na mufla por aproximadamente 4 horas a  $900^\circ\text{C}$ , transformando-se assim em cal virgem ( $\text{CaO}$ ) no processo chamado de calcinação. Segundo Guimarães (2002), a calcinação se inicia a  $750^\circ\text{C}$ , sendo que a temperatura ideal é entre  $900^\circ\text{C}$  e  $1100^\circ\text{C}$ . A temperatura de  $900^\circ\text{C}$  foi escolhida por ser a temperatura ideal mínima e a temperatura máxima da mufla utilizada. Durante a calcinação é liberado um cheiro bastante forte de ovo estragado. Esse processo gerou uma perda de 45% da massa original do pó de casca, ou seja, para cada 100 gramas de casca de ovo, produziu-se 55 gramas de cal virgem, quantidade ligeiramente maior que a relatada por Favretto (2020), que executou a calcinação a  $1050^\circ\text{C}$ . O processo experimental para a produção da cal a partir da casca do ovo está resumido na Figura 3.6.

Para a produção da cal hidratada de casca de ovo foi adotado o método de imersão, onde o pó da casca de ovo pós-calcinação (cal virgem) é imerso em água por 24 horas e posteriormente seco por 48 horas à temperatura de  $60^\circ\text{C}$ . A hidratação da cal foi feita em recipientes de cerâmica, sendo adotado a proporção em massa de três porções de água destilada para uma porção de cal; esse excesso de água é adicionado para controlar a temperatura gerada pelo calor da reação.

Figura 3.6 – Esquema do processo experimental para a produção da cal de casca de ovos



Fonte: elaborado pelo autor.

Por fim, a cal hidratada de casca de ovo foi triturada em moinho de bolas durante 12 horas. O material retido na peneira #30 foi de 0% permitindo a utilização de 100% do material, conforme especificações da norma ASTM C977 (ASTM 2018).

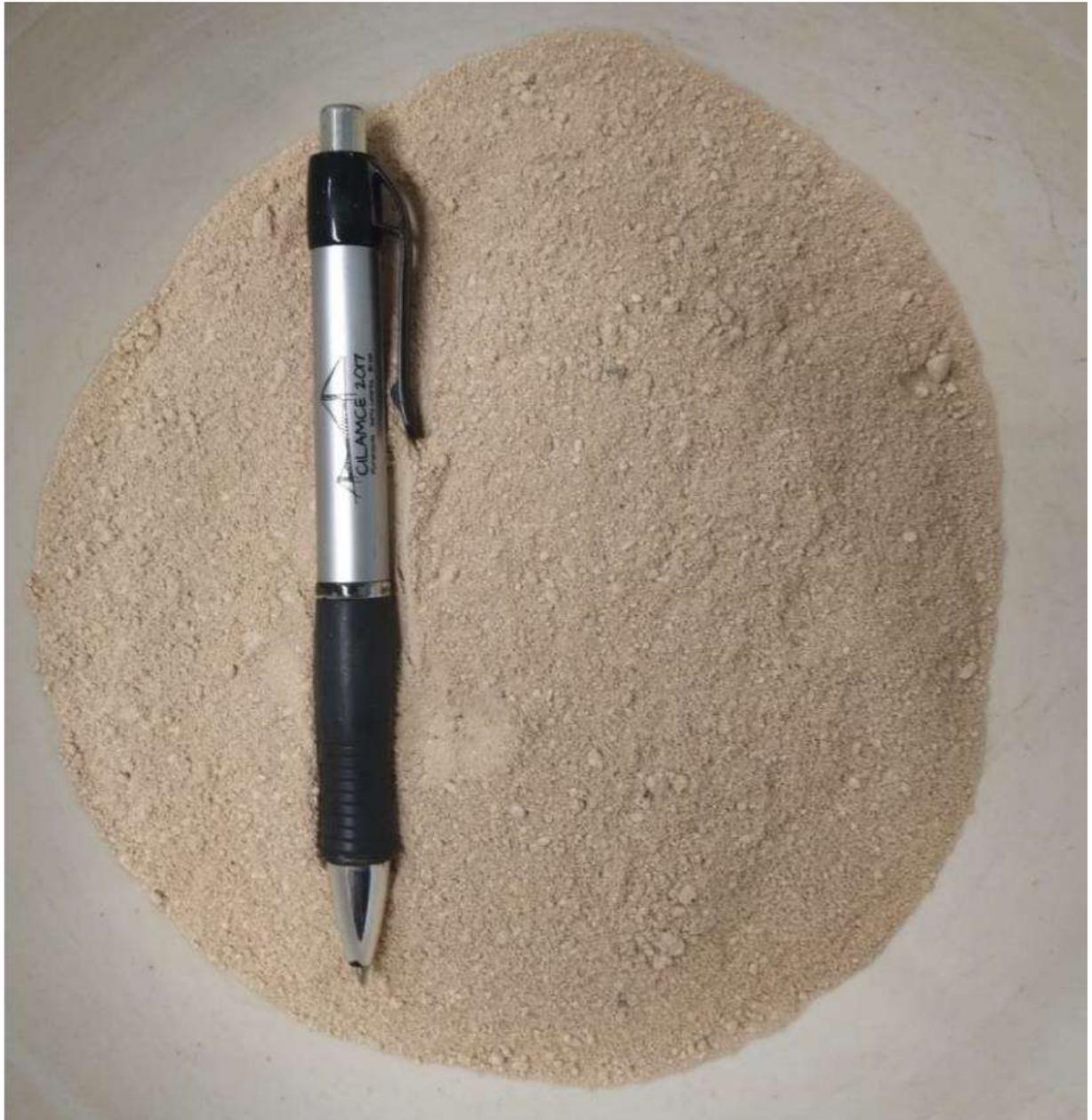
### 3.2.3 Preparação das amostras de solo

Para os ensaios de caracterização e para a moldagem dos corpos-de-prova, a amostra de solo foi seca ao ar, destorroada, peneirada e determinada a umidade higroscópica, seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 6457/86.

Após o destorroamento, o material passante na peneira #4 foi separado e homogeneizado. Para fim desta pesquisa, o material estudado foi o passante na peneira #4 (diâmetro de 4,80 mm). A utilização dessa fração granulométrica na presente pesquisa deve-se ao fato de possibilitar a moldagem dos corpos de prova com diâmetro de 5,0 cm, comum nos

laboratórios de mecânica dos solos, mantendo-se a relação entre a máxima dimensão dos grãos e o referido diâmetro dentro das especificações da norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D 2166 – 00. Essa norma, que descreve o método para a determinação da resistência a compressão simples para solos coesivos, determina que a maior partícula do solo ensaiado deve ser menor que um décimo do diâmetro do molde. A Figura 3.7 apresenta o solo passante na peneira 4,8 mm.

Figura 3.7 - Solo passante na peneira 4,8 mm.



Fonte: autor.

### 3.2.4 Ensaios de caracterização

Para todos os quatro materiais foram realizados os ensaios de massa específica real dos grãos e granulometria a laser. Além disso, para a cinza e para o solo foram realizados os ensaios de granulometria, massa específica real dos grãos, limites de liquidez e plasticidade.

Para o solo e para a mistura de solo com 25% de cinza foram realizados o ensaio de compactação e determinação do teor de umidade ótima.

Os ensaios de caracterização seguiram as respectivas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Para a preparação das amostras foram seguidos os procedimentos descritos na NBR 6457 (ABNT, 2016). O teor de umidade do solo e da cinza foram obtidos segundo o anexo da mesma norma. Para estabelecer os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) foram usados os ensaios descritos na NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente. Para traçar a curva granulométrica foi utilizado o ensaio prescrito pela NBR 7181 (ABNT, 2016) e para determinar a massa específica dos grãos seguiu-se a NBR 6508 (ABNT, 2016). Para o ensaio de compactação foram utilizados os procedimentos descritos pela NBR 7182 (ABNT, 2016), utilizando-se a energia de compactação Proctor Normal.

### 3.2.5 Dosagem

Para determinar o teor mínimo de cal da mistura solo-cal foi utilizado o método ICL (*Initial Consumption of Lime*), descrito na norma americana ASTM D6276- 19 (ASTM, 2019), em que a quantidade mínima usada será aquela em que o pH da mistura se estabiliza (Rogers *et al.*, 1997) (Figura 3.8).

Conforme descrito na norma ASTM D6276- 19 (ASTM, 2019), a menor percentagem de cal no solo que eleve o pH para 12,4 é a percentagem aproximada de cal para estabilizar o solo, à temperatura de 25°C. Sendo que a mesma determina que sejam feitos cinco teores de cal e uma amostra saturada.

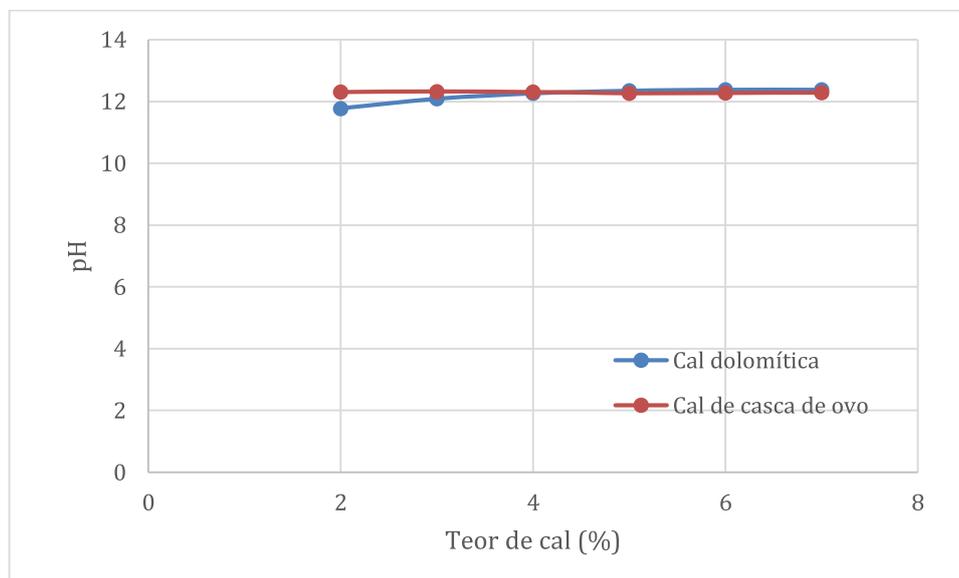
Figura 3.8: Ensaio do pH para os diferentes teores de cal.



Fonte: autor.

Na Figura 3.9 é apresentado os resultados da dosagem de cal para as diferentes misturas realizadas.

Figura 3.9 – Dosagem da cal pelo método do ICL.



Fonte: autor.

De acordo com o método, o teor mínimo de cal para o solo estudado seria de 2% para a cal de casca de ovo e de 5% para a cal dolomítica.

As porcentagens de 3% a 7% foram definidas para a presente pesquisa de acordo com a experiência brasileira e internacional com misturas de solo-cal (Dalla Rosa, 2009; Ghobadi *et al.*, 2014; Consoli *et al.*, 2015).

Para a definição do teor de cinza, Han (2015) comenta que as proporções de cinza na mistura solo-cinza-cal devem garantir que a mistura:

- Tenha resistência e durabilidade adequadas ao seu propósito;
- Seja de fácil manuseio e compactação;
- Seja viável economicamente.

Segundo Dalla Rosa (2009), a escolha do teor de cinza volante adicionado ao solo depende de muitas variáveis, mas, geralmente, varia de 12 a 30%. Onde solos finos costumam necessitar de maiores porcentagens de aditivos, e solos bem graduados, menores porcentagens

Nos trabalhos realizados por Carraro (1997), Dalla Rosa (2009), Seyrek (2018), Diallo e Unsever (2019) e Turan *et al.* (2022), referente às misturas de solo-cinza, com ou sem a adição de cal, o teor ótimo de cinza encontrado para as misturas foi de 20% a 25% da massa de solo.

A quantidade de cinza volante a ser utilizada nesta pesquisa foi, então, determinada considerando os resultados obtidos em trabalhos anteriores, além dos resultados dos testes de granulometria dos materiais e da facilidade de manuseio e compactação da mistura, sendo os teores adotados de: 0% (sem a adição de cinza), 12,5% e 25%.

### **3.2.6 Moldagem e Cura dos Corpos-de-prova para o ensaio de compressão simples**

Após a preparação das amostras de solo e de cinza volante em concordância com a NBR 7215-2019, as amostras foram armazenadas em sacos plásticos, devidamente identificados e vedados, até a data da sua utilização.

Foram utilizados, para os ensaios de compressão, corpos-de-prova cilíndricos de 5,0 cm de diâmetro e 10,0 cm de altura. A confecção dos corpos-de-prova foi realizada através dos procedimentos de pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento, armazenagem e cura. Os valores das massas específicas aparentes secas e teores de umidade adotados para a moldagem dos corpos de prova se basearam nas curvas de compactação obtidas para os materiais (solo e solo+25% de cinza volante), adotando-se valores exequíveis numa

situação de campo. Desta forma, nesta pesquisa trabalhou-se os valores de 1,48 g/cm<sup>3</sup>, 1,58 g/cm<sup>3</sup> e 1,68 g/cm<sup>3</sup>.

Após a pesagem dos materiais com resolução de 0,1 g, eles eram misturados com o auxílio de espátula até que a mistura adquirisse uma coloração uniforme. Em seguida, era adicionado água e, a amostra era, então, destorroada usando o almofariz e misturada novamente.

A quantidade de solo, cinza volante e cal constituem a massa seca total. Assim, a quantidade de cal necessária para cada mistura foi calculada em relação à massa de solo e cinza volante utilizada, sendo que a quantidade de água (teor de umidade) foi calculada em relação à soma das massas de solo, cinza volante e de agente cimentante. As misturas foram preparadas com 10% a mais de massa, que foi usado na determinação do teor de umidade do corpo-de-prova.

A quantidade de solo-cal ou solo-cinza-cal necessária para confecção de um corpo-de-prova era dividida em três partes iguais, armazenadas em recipientes com tampa para evitar a perda da umidade e o corpo de prova era imediatamente moldado.

A amostra era compactada usando prensa hidráulica em três camadas no interior de um molde de aço tripartido, devidamente lubrificado, de maneira que cada camada atingisse o peso específico aparente seco definido, tomando-se o cuidado de escarificar levemente os topos acabados da primeira e da segunda camada para aumentar a ligação entre as camadas superpostas.

Concluído o processo de moldagem, o corpo-de-prova era imediatamente extraído do molde, sua massa e medidas (diâmetro e altura) devidamente anotados com resolução de 0,1g e 0,1mm respectivamente, e acondicionado em um saco plástico adequadamente identificado e vedado para evitar variações significativas do teor de umidade. Os corpos-de-prova assim obtidos eram armazenados e curados por um período de 28 dias, em um ambiente com temperatura de 23° (± 5°C).

O tempo de cura foi definido a partir do tempo hábil para analisar a resistência à compressão simples de misturas solo-cinza-cal e também do tempo necessário para que as reações químicas dessas misturas ocorressem. As misturas de areia argilosa estabilizada com quantidades de cinza e cal similares à usadas neste trabalho estudadas por Consoli *et al.* (2015) apresentaram para 28 dias e 90 dias de cura, em média, 25% e 50 % do valor de RCS em relação às mesmas misturas com 360 dias de cura, respectivamente. Outros trabalhos com solos

estabilizados com cal e cinza mostram que, para 28 dias de cura, a RCS atingida é superior à 50% da RCS para 90 dias de cura, com solos mais reativos atingindo 85% da RCS para 90 dias de cura em 28 dias de cura (Dalla Rosa, 2009; Eskisar, 2021). Diallo e Unsever (2019), ao estudar misturas de solo-cal-cinza volante, observou que, as RCS atingidas 3 e 7 dias de curas eram 50% e entre 60% a 85% em relação às RCS obtidas com 28 dias de cura.

Embora seja evidente a influência do tempo de cura sobre a resposta à compressão simples de misturas solo-cal solo-cal-cinza volante, na presente pesquisa serão somente ensaiados corpos-de-prova curados a 28 dias. Dessa forma, será avaliado para um tempo fixo de cura qual a influência do aditivo e proporção utilizada.

No vigésimo sétimo dia os corpos de provas eram submersos em água do abastecimento público, ao longo de 24 horas, visando à saturação e evitando medidas de sucção nos ensaios de compressão (Consoli *et al.* 2009a,b). Na Figura 3.10 apresenta-se o corpo de prova pronto para imersão. Após as 24 horas era realizado o ensaio de compressão simples.

Figura 3.10 - Corpo de prova



Fonte: autor.

### 3.2.7 Controle de qualidade das amostras

Em virtude do processo de moldagem ser totalmente manual, deve-se seguir critérios rigorosos, com a finalidade de que a amostra ensaiada esteja de acordo com os seguintes parâmetros. Foram considerados válidos para os ensaios, os corpos de prova que atenderam às seguintes tolerâncias:

- massa específica aparente seca ( $\gamma_d$ ): grau de compactação de  $\pm 2,5\%$  do especificado;
- teor de umidade ( $w$ ):  $\pm 5,0\%$  do especificado;
- diâmetro: 50,3 mm ( $\pm 2,5\%$ );
- altura: 100,3 mm ( $\pm 2,5\%$ );

Devido à dispersão característica dos ensaios de compressão simples, foram moldados corpos-de-prova em triplicata para cada mistura obtendo-se, assim, uma maior confiabilidade dos resultados. A moldagem dos corpos-prova do experimento foi realizada em sequência aleatória.

### 3.2.8 Ensaio de compressão simples

Para o ensaio de compressão simples, seguiu-se as diretrizes da norma NBR 5739 (ABNT, 2018). A resistência considerada foi a média da resistência obtida em um mesmo ponto para três amostras, dentro da faixa de variação de 10%, em relação à média, tanto para mais quanto para menos, de acordo com a NBR 12253 (ABNT, 2012).

Para estes ensaios foi utilizada uma prensa automática com capacidade máxima de 100 kN, calibrada no dia 30/10/23, além de anéis dinamométricos calibrados com capacidade de 0,5 kN e 50,0 kN e resolução de 0,005 kN (0,5 kgf) e 0,023 kN (2,3 kgf) respectivamente (Figura 3.12). A velocidade de deformação destes ensaios era de 1,14 mm por minuto. O procedimento dos ensaios de compressão simples seguiu a norma americana ASTM D 5102 (ASTM, 1996).

Para o cálculo da resistência à compressão simples ( $qu$ ) para cada amostra seguiu-se a Equação (5):

$$qu = Q/D_m \quad (5)$$

Onde:

$Q$  = carregamento aplicado à amostra e obtido pela calibração da célula de carga;

$D_m$  = diâmetro médio da amostra.

Figura 3.12: Prensa usada para o ensaio de compressão simples



Fonte: autor.

### 3.2.9 Ensaio de difração de raio X

Afim de melhor entender a composição química e mineralógica dos materiais estudados, assim como comparar com os dados da literatura e fornecidos pelo fabricante da cal, foi realizado o ensaio de difração de raio X (XRD).

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Difração de Raios X (LDRX) da UFSC e a interpretação dos dados obtidos foi realizada com o auxílio do prof. Dr. Carlos Eduardo Maduro de Campos, supervisor do laboratório.

Para a realização dos ensaios, foi utilizado um difratômetro de raios X de pó multiuso Xpert com radiação  $\alpha$ -Cu ( $\lambda = 1,541874 \text{ \AA}$ ) na faixa de ângulo  $2\theta$  de 7 a  $90^\circ$ , 3 varreduras, com tamanho de passo de 0,0160 e tempo de contagem de 59,69 s. As análises de dados de

XRD foram realizadas usando o método Rietveld [x] implementado no pacote de software TOPAS (Coelho, 2018). Os arquivos de difração de pó do ICDD (*International Center for Diffraction Data*) e o arquivo de informações cristalográficas do banco de dados de estrutura cristalina inorgânica foram utilizados na modelagem inicial. A qualidade dos ajustes foi monitorada pelos parâmetros de concordância R- perfil ponderado  $R_{wp}$  e qualidade de ajuste GOF (*Goodness of Fit*).

### **3.2.10 Ensaio de microscopia**

Com o intuito de observar a interação dos materiais utilizados em escala nanométrica foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para as seguintes misturas:

- Solo
- Solo com 7% de cal dolomítica;
- Solo com 7% de cal de casca de ovo;
- Solo com 7% de cal dolomítica e 25% de cinza volante;
- Solo com 7% de cal de casca de ovo e 25% de cinza volante.

Os ensaios foram realizados no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) da UFSC usando o microscópio JEOL JSM-6390LV (microscópio de varredura convencional com filamento de tungstênio com magnificação de 25x a 300.000x).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios realizados na presente pesquisa. Inicialmente são apresentados e discutidos os ensaios de caracterização dos materiais utilizados e na sequência são apresentados, analisados e discutidos os resultados dos ensaios de compressão simples das misturas.

### 4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste item são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de caracterização do solo, cales e cinza volante utilizados nas misturas.

#### 4.1.1 Solo

A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos resultados fornecidos pelos ensaios de análise granulométrica, limites de Atterberg e massa específica real dos grãos e a Figura 4.1 apresenta a curva granulométrica do solo.

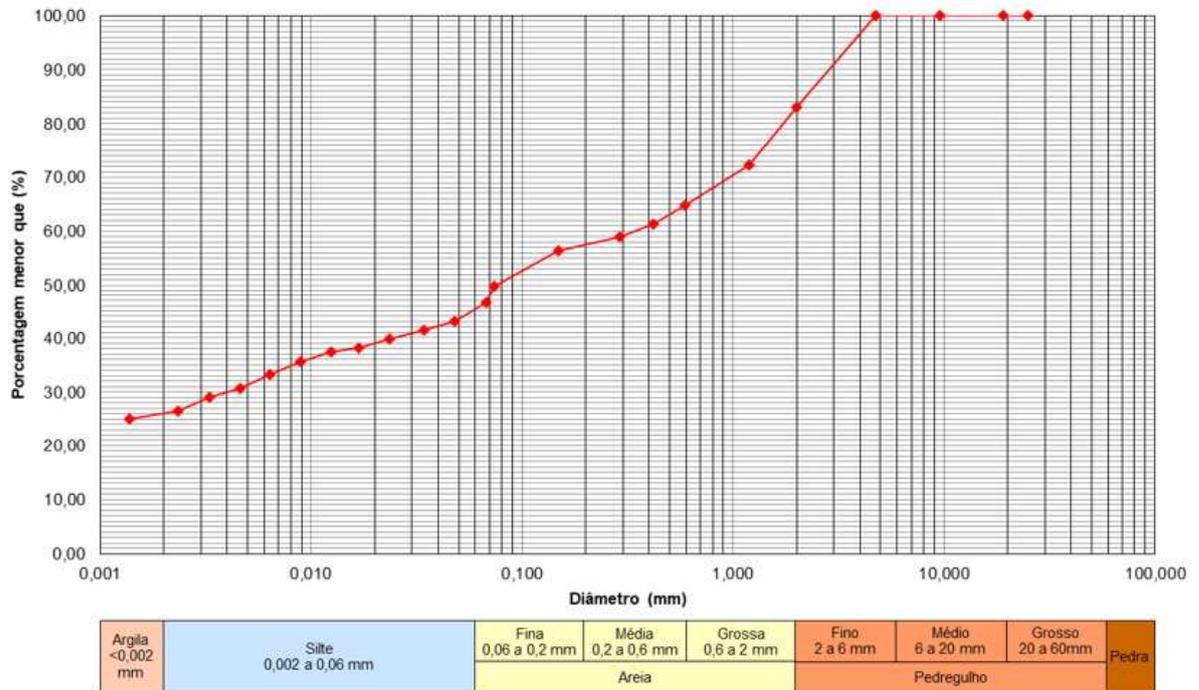
É possível observar, a partir da análise granulométrica e dos Limites de Atterberg, que o solo residual de granito apresentou uma fração argilosa considerável, com mais de 25% de grãos com dimensão inferior a 0,002 mm de diâmetro, sendo que essa argila apresenta um LL alto (>50%). Dessa forma, o solo pode ser classificado, segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos, como CH, argilas de plasticidade média ou alta. E pela classificação do *Highway Research Board*, adotada pela AASHTO, como A-7-5, solo argiloso com comportamento geral como subleito fraco a pobre. Os resultados encontrados estão de acordo com a literatura sobre o solo do local (Pecapedra, 2016; Nunes, 2017; Pedroso, 2019).

Tabela 4.1 – Resumo dos resultados dos ensaios de análise granulométrica, limites de Atterberg e massa específica dos grãos

Ensaio		Solo residual de granito (passante na peneira 4,8 mm)	Solo residual de granito (passante na peneira 2,0 mm) Fonte: Pecapetra, 2016.
Limites de Atterberg	LL (%)	61	59
	LP (%)	35	39
	IP (%)	26	20
Massa específica dos Grãos	(g/cm <sup>3</sup> )	2,65	2,70
Análise Granulométrica (material passante na peneira #4)	Argila (%)	25	45
	Silte (%)	20	13
	Areia Fina (%)	12	9
	Areia Média (%)	8	10
	Areia Grossa (%)	18	22
	Pedregulho Fino (%)	17	0

Fonte: elaborado pelo autor.

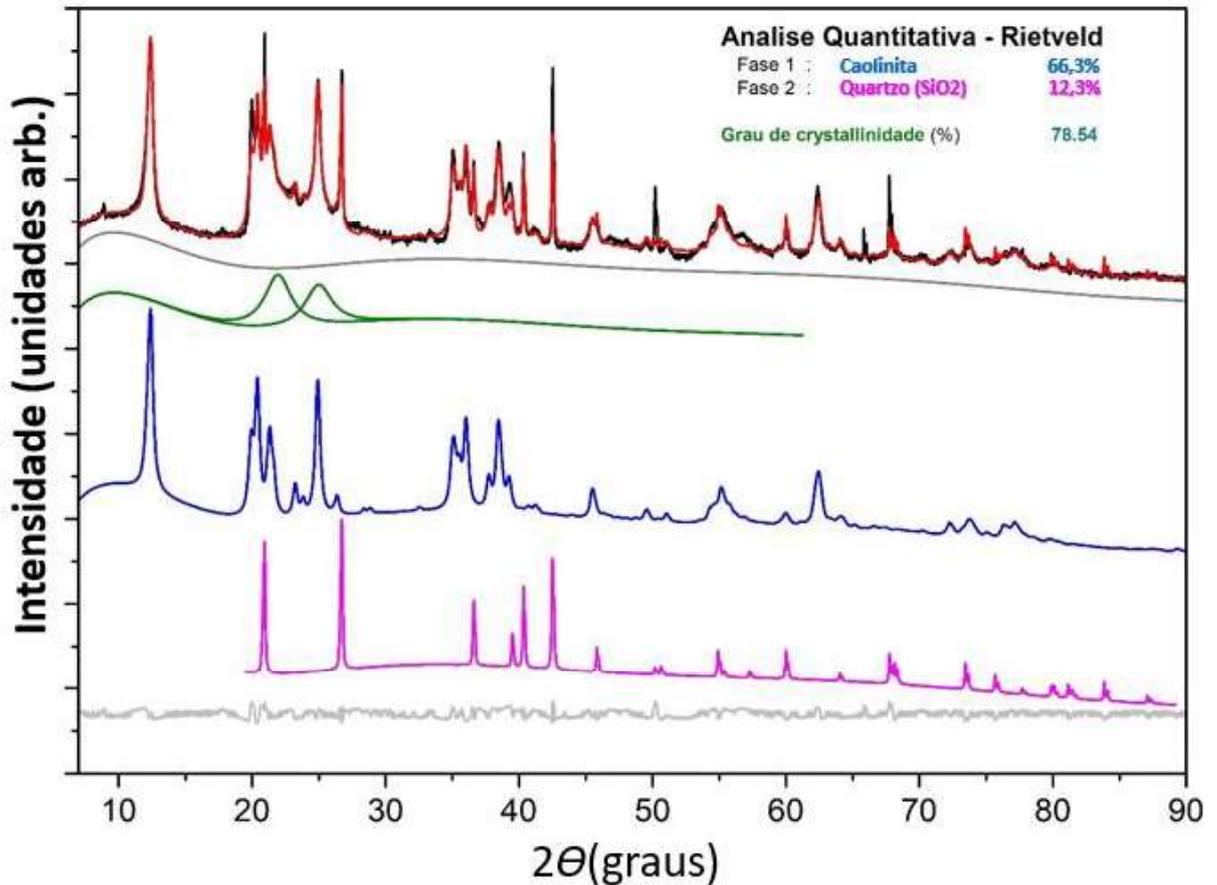
Figura 4.1 – Curva granulométrica realizada do material passante na peneira 4,8mm do solo residual.



Fonte: elaborado pelo autor.

Através dos dados obtidos do ensaio de difração de Raio X para a fração de argila do solo (Fig 4.2), observa-se que a mesma é composta de 66,3% de caulinita, 12,3% de quartzo e 22,5% de materiais não cristalinos (amorfos), os resultados estão de acordo com Lacerda *et al.* (2001) que afirma que solos podzólicos (argissolos) derivados de granito encontrados no Brasil possuem predominância de caulinita na sua fração argila.

Figura 4.2 – Interpretação do resultado do ensaio de difração de raio X para a fração argila do solo.

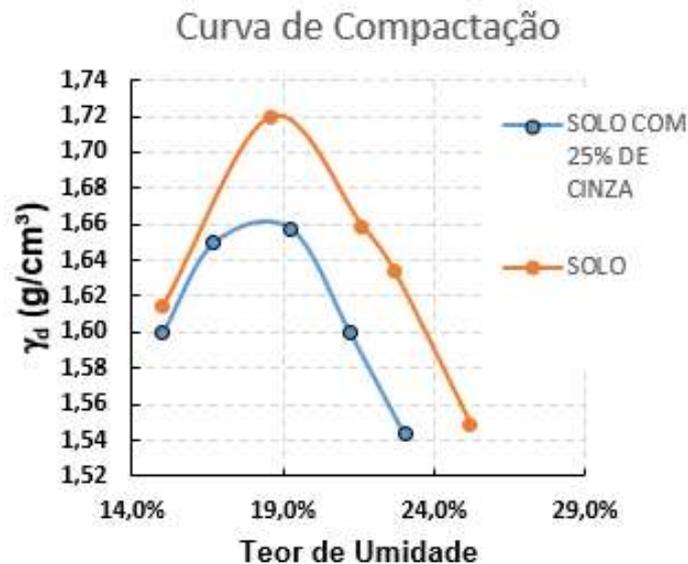


Fonte: elaborado pelo Prof. Dr. Carlos Eduardo Maduro de Campos - LDRX.

Também como parte da caracterização do solo e obtenção de parâmetros para compactação das misturas foram realizados ensaios de compactação no solo natural e no solo com adição de cinza. Os resultados destes ensaios são mostrados na Figura 4.2. Nela pode-se observar as curvas de compactação para o solo com 0% de cinza volante e para o solo com 25% de cinza volante.

De acordo com Pinto (2006), três aspectos em relação aos formatos das curvas de compactação devem ser observados: a declividade dos ramos secos e úmidos, o teor de umidade ótima e a máxima densidade seca. Solos argilosos apresentam umidade ótima elevada, bem como uma declividade mais íngreme, decorrente do seu comportamento mais próximo ao laterítico, como é o caso do solo residual de granito estudado.

Figura 4.2 – Curvas de Compactação para o solo e solo com 25% de cinza.



Fonte: elaborado pelo autor.

O solo sem aditivos apresentou umidade ótima de 18,5% e peso específico aparente seco de 1,72 g/m<sup>3</sup>, enquanto que o solo como com 25% de cinza volante apresentou a mesma umidade ótima que a amostra de solo, porém com menor peso específico aparente seco (1,66 g/m<sup>3</sup>). Os trabalhos de Turan *et al.* (2022) e Dalla Rosa (2009) também observaram uma redução do peso específico aparente seco ao se acrescentar cinza volante ao solo, porém, diferente do que foi observado nesse trabalho, a adição de cinza volante ao solo causou um aumento no teor de umidade ótima. Através das curvas de compactação obtidas, foram determinados o valor de umidade e os três pesos específicos utilizados para a confecção das amostras.

#### 4.1.2 Cales e cinza volante

A Tabela 4.2 apresenta a composição química das cales e da cinza volante utilizadas, com base nos dados fornecidos pelo fabricante (cal dolomítica), Ferraz *et al.* (2018) para a cal de casca de ovo e Rohde *et al.* (2006) para a cinza volante da termelétrica Jorge Lacerda, para fins de comparação com os resultados de DRX encontrados na presente pesquisa.

Observa-se que ambas as cales apresentam perda ao fogo parecidas, porém, a cal de casca de ovo é constituída essencialmente de CaO, enquanto que a cal dolomítica possui uma quantidade considerável de MgO, numa relação aproximada de 3:2.

Tabela 4.2 - Composição química dos aditivos utilizados.

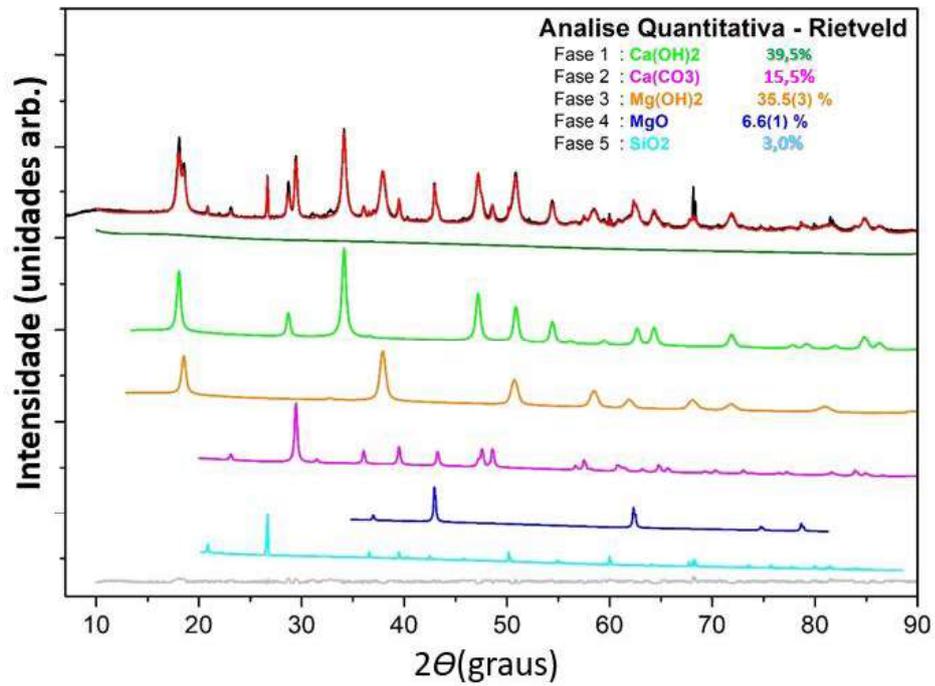
Elemento (%)	Cal dolomítica	Cal de casca de ovo	cinza volante
Perda ao Fogo	23,3%	21.6%	2,6%
CaO	44,8%	76.8%	1,4%
MgO	27,9%	0,9%	0,9%
SiO <sub>2</sub>	<4,0%	0,2%	55,6%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,0%	28,7%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,1%	7,2%
SO <sub>3</sub>		0,2%	0,4%
Na <sub>2</sub> O		0,1%	0,2%
K <sub>2</sub> O		0,0%	2,3%

Fonte: elaborado pelo autor.

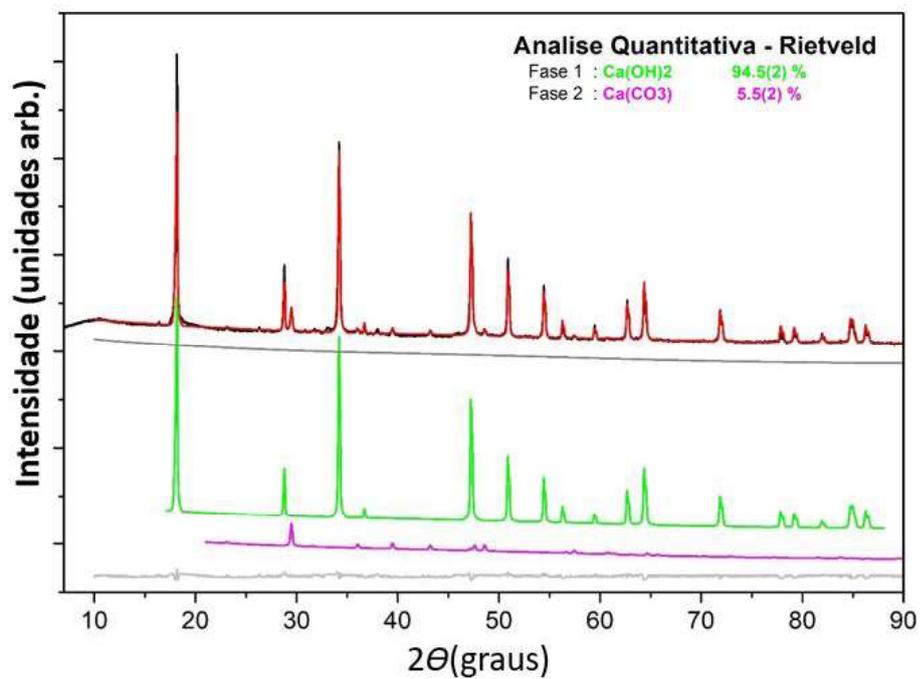
A Figura 4.3 apresenta a interpretação do ensaio de difração de raio X para (a) a cal dolomítica e (b) a cal de casca de ovo.

O ensaio de difração de raio X mostra uma composição da cal dolomítica bem diferente da fornecida pelo fabricante, com teores de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio bem parecidos, 39,5% e 35,5%, respectivamente, além de 15,5% de carbonato de cálcio, mostrando uma calcinação incompleta do calcário, além de 3% de quartzo e 6,6% de óxido de magnésio. Os resultados da cal da casca de ovo corroboram os resultados encontrados na literatura, mostrando a pureza do material, além da relativa eficiência no processo de calcinação realizado, sendo a cal formada por 94,5% de hidróxido de cálcio e 5,5% de carbonato de cálcio (material não calcinado).

Figura 4.3 – Interpretação do resultado do ensaio de difração de raio X para a (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.



(a)

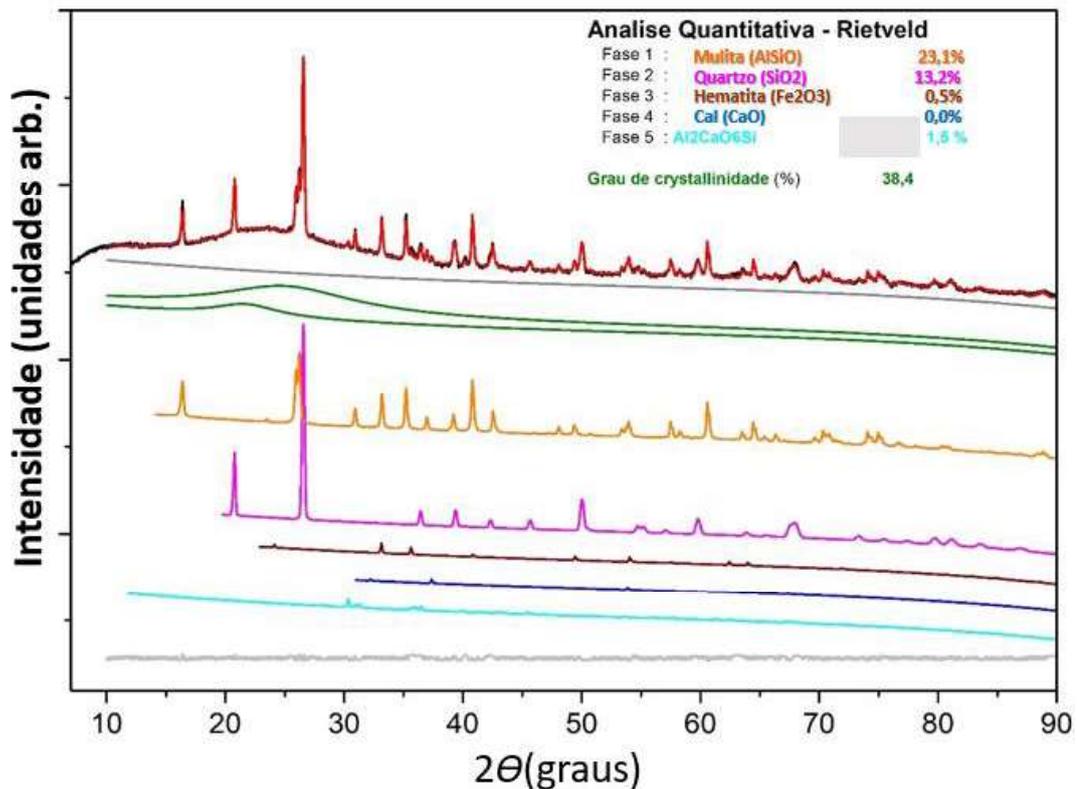


(b)

Fonte: elaborado pelo Prof. Dr. Carlos Eduardo Maduro de Campos - LDRX.

A Figura 4.4 apresenta a interpretação do ensaio de difração de raio X para a cinza volante utilizada. É possível notar que a maior parte do material está na fase amorfa (61,6%), não permitindo estimar sua composição exata através deste ensaio. Além da fase amorfa, observa-se que a cinza volante estudada é composta de 23,1% de mulita ( $\text{AlSiO}$ ), 13,2% de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), 1,5% de silicato de cálcio e alumínio e 0,5% de óxido de ferro (hematita).

Figura 4.4 – Interpretação do resultado do ensaio de difração de raio X para a cinza volante



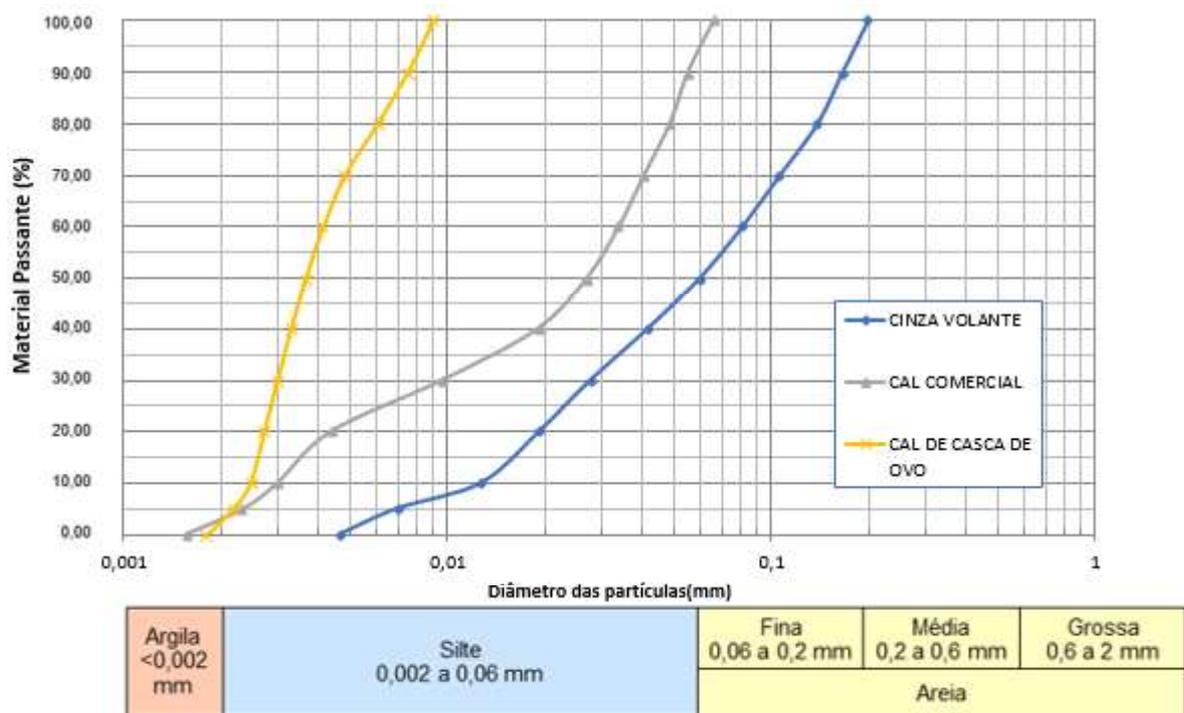
Fonte: elaborado pelo Prof. Dr. Carlos Eduardo Maduro de Campos - LDRX.

De acordo com Rohde *et al.* (2006), é importante lembrar que a composição química das cinzas volantes está profundamente relacionada com as características dos carvões dos quais são originadas. Considerando as características mineralógicas, de uma forma geral, as cinzas volantes, constituem-se predominantemente, de material vítreo de natureza sílicoaluminosa e em menor proporção de compostos cristalizados. Quanto às características químicas das cinzas volantes oriundas das termelétricas da região sul do país, pode-se dizer que mais de 90% consistem em sílica, alumina e óxido de ferro, além de óxido de cálcio, magnésio, sódio, potássio, titânio e outros em menores teores. Devido ao alto teor de material amorfo presente na cinza volante, não é possível determinar a composição química exata da cinza volante através do ensaio de DRX.

Rohde *et al.* (2006) comenta ainda sobre as características físicas das cinzas volantes que, normalmente, são caracterizadas por uma granulometria siltosa, às vezes, com presença de partículas do tamanho de areias, sendo materiais não plásticos e não coesivos, com a massa específica dos grãos variando entre 2050kg/m<sup>3</sup> e 2200kg/m<sup>3</sup>. Na presente pesquisa encontrou-se um valor nulo de plasticidade e uma massa específica dos grãos de 2120 kg/m<sup>3</sup>, dentro da faixa definida pela literatura.

A Figura 4.5 apresenta as curvas granulométricas à laser das cales dolomítica e de casca de ovo e da cinza volante utilizadas na pesquisa.

Figura 4.5 – Curva Granulométrica dos materiais



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 4.3: Tamanho das partículas de cal e cinza volante.

	Cal de casca de ovo	Cal dolomítica	Cinza volante
Argila (%)	2,5	2,5	0
Silte (%)	97,5	92,5	50,0
Areia Fina (%)	0	5,0	50,0
D <sub>50</sub> (mm)	0,004	0,027	0,06

Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se pela curva granulométrica das cales que a cal comercial apresenta grãos de maior diâmetro comparados à cal de casca de ovo. Para a cal comercial, 80% das partículas apresentam diâmetro entre 0,055 mm e 0,003 mm, enquanto a cal de casca de ovo possui 80% das partículas entre 0,008 mm e 0,003. A cinza volante apresenta tamanho das partículas maiores que os das cales, com 50% dos grãos na faixa de silte e 50% na faixa de areia fina.

## 4.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES

As Tabelas A.1 a A.6 do apêndice “A”, apresentam as características de todos os corpos-de-prova ensaiados à compressão simples, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental. Pode-se observar nestas tabelas que os dados foram agrupados a cada três linhas pois correspondem às três repetições para um mesmo ponto de moldagem (mesmo teor de umidade, porosidade, teor de cal e/ou teor de cinza volante).

Nos itens a seguir são apresentados os resultados obtidos e em seguida são discutidos os efeitos das principais variáveis sobre a RCS das misturas. Na sequência são avaliadas relações entre índices das misturas e o efeito sobre a RCS das mesmas.

### 4.2.1 Efeito dos teores de cal e comparativo entre as cales

Nos itens a seguir são comparados os resultados obtidos para os testes de compressão simples para os dois tipos de cal analisados para misturas com solo e com solo e 12,5% e 25% de cinza volante.

#### 4.2.1.1 Misturas com cal

A Tabela 4.4 apresenta um resumo dos resultados obtidos para os ensaios de RCS das misturas com solo e cal a partir dos dados constantes na Tabelas A.1 e A.2 do Apêndice A, usando a média dos três corpos de prova rompidos para cada mistura, para os três pesos específicos ( $\gamma_d$ ) e para os três teores de cal ( $L$ ).

Tabela 4.4: RCS média das misturas de solo e cal.

$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$L$ (%)	RCS (kPa)		Diferença de RCS em relação à cal dolomítica (%)
		Cal dolomítica	Cal de casca de ovo	
1,5	3	90,8	546,7	601%
1,5	5	205,9	1036,0	503%
1,5	7	390,0	1204,5	309%
1,6	3	196,0	1158,5	591%
1,6	5	372,2	2027,1	545%
1,6	7	723,2	2278,4	315%
1,7	3	392,1	2153,0	549%
1,7	5	662,6	2795,4	422%
1,7	7	1108,1	3090,3	279%

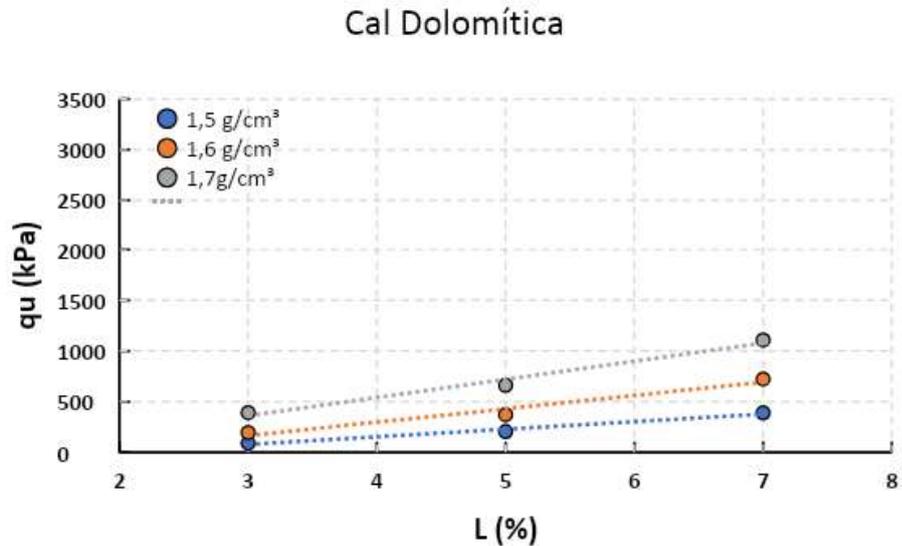
Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 4.6, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função do teor de cal (dolomítica e de casca de ovos) para 28 dias de cura. Cada curva possui a mesma massa específica aparente seca e todos os corpos de prova foram moldados com o mesmo teor de umidade ( $\omega = 19,5\%$ ). Ambos os gráficos das figuras foram plotados na mesma escala vertical, visando a melhor visualização do comparativo entre os resultados obtidos para cada uma das cales.

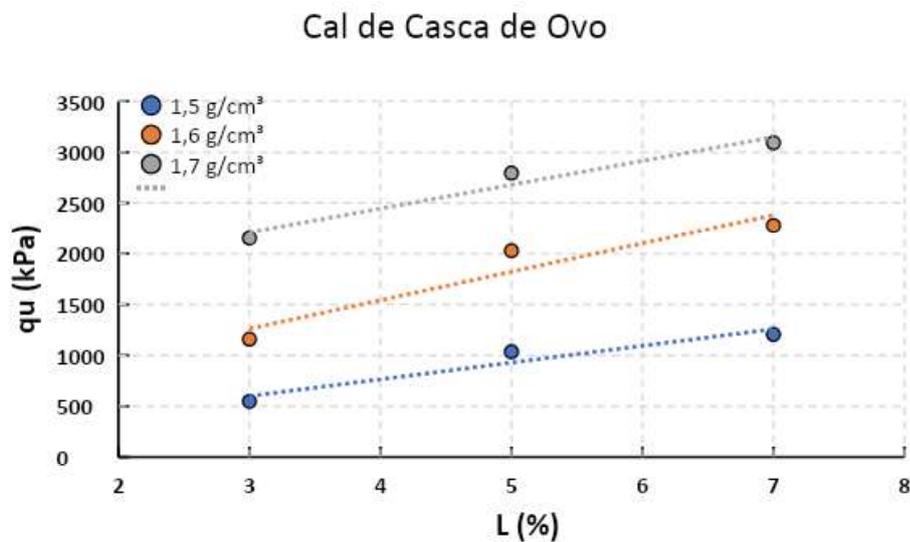
Na Figura 4.6 verifica-se que, para ambas as cales ensaiadas, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento da quantidade de cal na faixa dos teores estudados.

A Figura 4.6 mostra que a cal de casca de ovo proporciona um aumento significativo da RCS do solo estudado, mesmo para pequenos teores de cal, enquanto que os ganhos de resistência obtidos com a cal comercial foram muito inferiores aos ganhos verificados com a adição da cal de casca de ovos, considerando os mesmos teores. Por exemplo, para um mesmo  $\gamma_d$ , a RCS obtida com 3% de adição de cal de casca de ovos é superior a RCS obtida com a adição de 7% da cal dolomítica comercial.

Figura 4.6 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 0% de cinza volante para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.



(a)



(b)

Fonte: elaborado pelo autor.

No entanto, verificou-se que o aumento dos teores de cal de casca de ovo oferece um ganho de RCS à mistura a uma taxa menor que à cal comercial. Por exemplo, ao se aumentar a quantidade de cal dolomítica de 3% para 7%, a resistência à compressão simples aumentou, para o  $\gamma_d$  de  $1,6 \text{ g/cm}^3$ , de 196 kPa para 723 kPa, ou seja, um aumento de 3,7 vezes, enquanto que para a cal de casca de ovo, para o mesmo  $\gamma_d$ , a RCS foi de 1.159 kPa para 2.278 kPa para

3% e 7% de cal, respectivamente, resultando num um aumento 2,0 vezes. Essa tendência faz com que, para um mesmo valor de  $\gamma_d$ , para teores maiores de cal, a diferença da RCS entre as cales diminua, sendo aproximadamente 5,7 vezes para 3% de cal e 3,0 vezes para 7% de cal, como mostrado na Tabela 4.4. Esse padrão foi observado para todos os valores de  $\gamma_d$ .

Através da equação da linha de tendência do ganho de RCS da cal dolomítica observa-se, ainda, que os coeficientes angulares das retas de ajuste são crescentes com o aumento do valor de  $\gamma_d$  das misturas, fato que indica que o ganho de resistência com o acréscimo da porcentagem de cal é mais pronunciado para as misturas mais densas (maior grau de compactação). Já para a cal de casca de ovos também se observou um aumento no coeficiente angular da reta que definiu as resistências para os valores de  $\gamma_d$  de 1,5 g/cm<sup>3</sup> em relação à reta que definiu as resistências para as misturas com  $\gamma_d$  de 1,6 g/cm<sup>3</sup>. Para as resistências correspondentes às misturas com  $\gamma_d$  de 1,7 g/cm<sup>3</sup> verificou-se uma leve queda no valor do coeficiente angular da reta. No entanto, tal ocorrência pode estar relacionada à maior dispersão dos valores de resistência obtidos para o  $\gamma_d$  de 1,6 g/cm<sup>3</sup>, não sendo possível afirmar com precisão se poderia estar ocorrendo uma redução de ganho de resistência pelo acréscimo de cal com o  $\gamma_d$  de 1,7 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.2.1.2 Misturas com cal e 12,5% de cinza volante

A Tabela 4.5 apresenta um resumo dos resultados obtidos para os ensaios de RCS das misturas com solo, cal e 12,5% de cinza, a partir dos dados constantes na Tabelas A.3 e A.4 do anexo A, usando a média dos três corpos de prova rompidos para cada mistura.

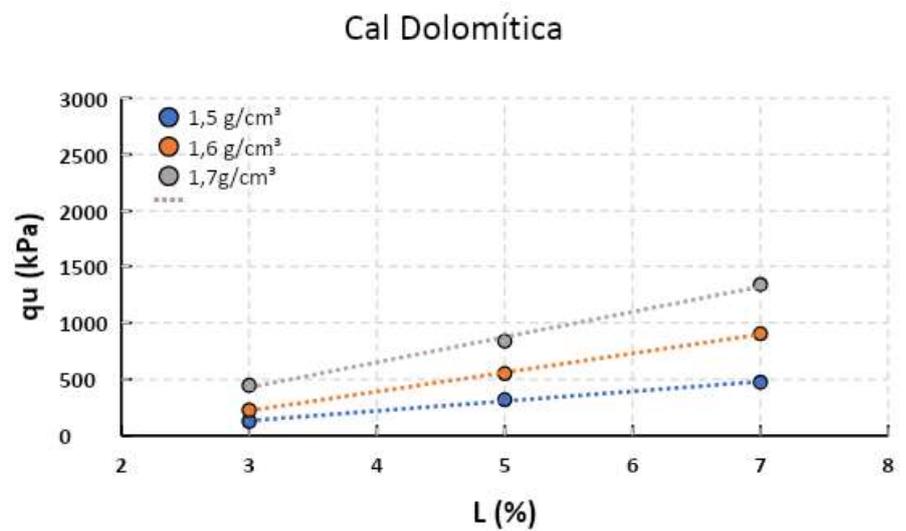
Tabela 4.5: RCS média das misturas de solo e cal com 12,5% de cinza volante.

$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	L (%)	RCS (kPa)		Diferença de RCS em relação à cal dolomítica (%)
		Cal dolomítica	Cal de casca de ovo	
1,5	3	126,3	615,7	488%
1,5	5	317,7	1147,5	361%
1,5	7	472,5	1162,9	246%
1,6	3	225,9	1136,6	503%
1,6	5	550,0	1803,9	328%
1,6	7	901,5	2271,1	252%
1,7	3	444,7	1519,6	342%
1,7	5	835,9	2341,9	280%
1,7	7	1337,8	2770,6	207%

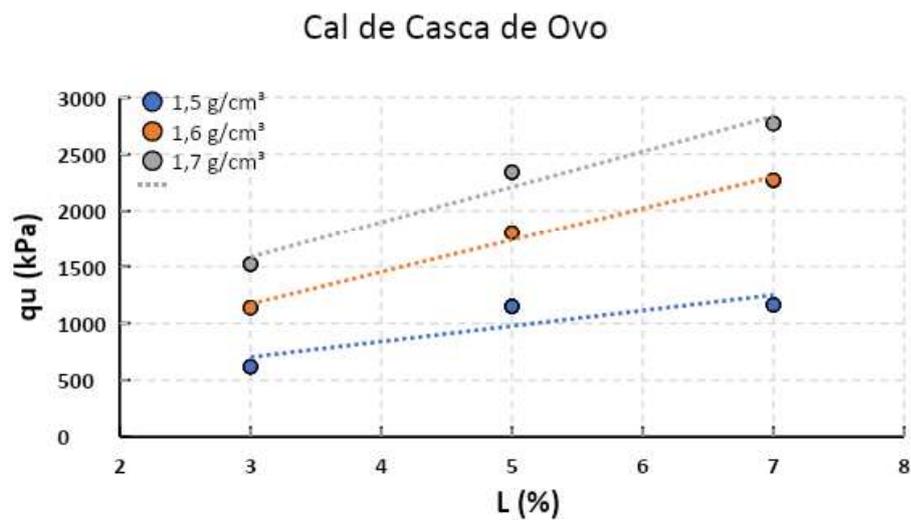
Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 4.7, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função do teor de cal (dolomítica e de casca de ovos) para 28 dias de cura. Cada curva possui a mesma massa específica aparente seca e todos os corpos de prova foram moldados com o mesmo teor de umidade ( $\omega = 19,5\%$ ). Ambos os gráficos das figuras foram plotados na mesma escala vertical, visando a melhor visualização do comparativo entre os resultados obtidos para cada uma das cales.

Figura 4.7 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 12,5% de cinza volante para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.



(a)



(b)

Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 4.7 verifica-se que, para ambas as cales ensaiadas, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento da quantidade de cal na faixa dos teores estudados.

Ao se comparar os valores de RCS obtidos para as misturas unicamente de solo e cal com os valores obtidos para as misturas de solo, cal e 12,5% de cinza, verifica-se que há um ganho de resistência para todas as misturas feitas com cal dolomítica, indicando um efeito positivo da adição da cinza na RCS. Por outro lado, a RCS obtida para as misturas de solo, cal de casca de ovos e 12,5% de cinza em sua grande maioria foi inferior à RCS obtida para as misturas feitas unicamente com solo e cal de cascas de ovos. Apenas os teores de 3 e 5% de cal de casca de ovos, para um  $\gamma_d$  de 1,5 g/cm<sup>3</sup> e 12,5% de cinzas apresentaram um leve acréscimo na RCS em relação à mistura de solo e cal de casca de ovos exclusivamente. Uma análise mais detalhada do efeito da cinza sobre a RCS será apresentada mais adiante, contrapondo os resultados obtidos (ver item 4.2.2 deste trabalho).

Conforme demonstrado na Figura 4.7, apesar da divergência de comportamento de ganho de resistência entre as misturas com cal dolomítica e cal de casca de ovos, verifica-se que mesmo com um ganho de resistência inferior do apresentado apenas pela mistura de solo e cal, as RCSs das misturas com cal de casca de ovos foram significativamente superiores àquelas obtidas para a cal dolomítica, mesmo para pequenos teores de cal. Os ganhos de resistência obtidos com a cal comercial foram muito inferiores aos ganhos verificados com a adição da cal de casca de ovos para os mesmos teores de cal. Por exemplo, para um mesmo  $\gamma_d$ , a RCS obtida com 3% de adição de cal de casca de ovos é superior a RCS obtida com a adição de 7% da cal dolomítica comercial.

Com base nas equações das retas de ajuste linear da RCS, apresentadas na Figura 4.7, observa-se que tanto para a cal dolomítica, quanto para a cal de casca de ovos, há um incremento no coeficiente angular da reta com o aumento do valor de  $\gamma_d$ . Tal fato evidencia o maior ganho de resistência com o acréscimo da porcentagem de cal em misturas mais densas (maior grau de compactação).

#### *4.2.1.3 Misturas com cal e 25,0% de cinza volante*

A Tabela 4.6 apresenta um resumo dos resultados obtidos para os ensaios de RCS das misturas com solo, cal e 25% de cinza, a partir dos dados constantes na Tabelas A.5 e A.6 do anexo A, usando a média dos três corpos de prova rompidos para cada mistura.

Tabela 4.6: RCS média das misturas de solo e cal com 25% de cinza volante.

$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$L$ (%)	RCS (kPa)		Diferença de RCS em relação à cal dolomítica (%)
		Cal dolomítica	Cal de casca de ovo	
1,5	3	180,9	665,2	368%
1,5	5	368,8	1285,5	349%
1,5	7	687,0	1342,0	195%
1,6	3	378,7	1117,8	295%
1,6	5	679,0	1690,4	249%
1,6	7	931,8	2172,5	233%
1,7	3	351,3*	1430,4	407%
1,7	5	869,2	2190,4	252%
1,7	7	1259,0	2333,2	185%

Fonte: elaborado pelo autor

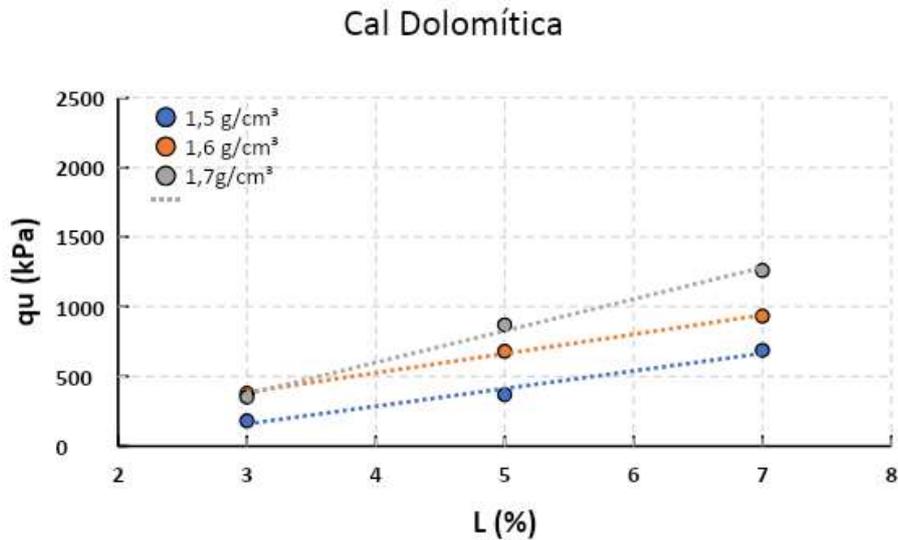
Legenda: \*Possível problema da determinação da RCS desta mistura

Em análise aos dados apresentados na Tabela 4.6, é importante observar que a média dos corpos de prova da mistura com solo, cal dolomítica e 25% de cinza volante para de  $\gamma_d$  de 1,7 g/cm<sup>3</sup> e  $L$  de 3% (destacado na tabela) apresentou um valor de RCS de 351 kPa, valor muito abaixo do esperado, que, conforme tendência das demais porcentagens, deveria estar entre 450 kPa e 600 kPa. Acredita-se que possa ter ocorrido algum problema durante a moldagem ou processo de cura destes corpos de prova que possam ter afetado a RCS final.

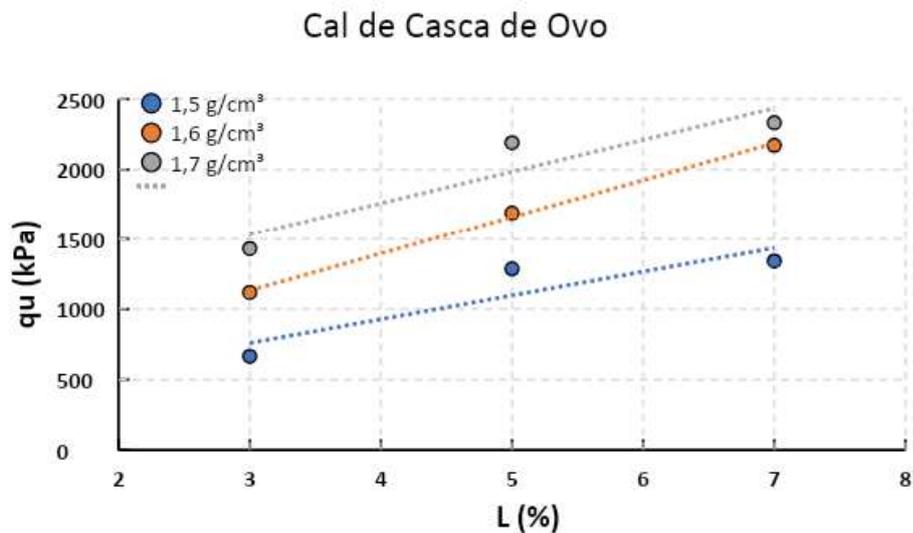
Os resultados de RCS das misturas com adição de 25% de cinza volante demonstram que conforme aumenta a quantidade de cinza nas misturas, reduz a diferença entre as resistências obtidas para as diferentes cales. As diferenças percentuais entre as resistências foram menores que para as misturas somente com cal e para as misturas com 12,5% de cinza.

Na Figura 4.8, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função do teor de cal (dolomítica e de casca de ovos) para 28 dias de cura. Cada curva possui a mesma massa específica aparente seca e todos os corpos de prova foram moldados com o mesmo teor de umidade ( $\omega = 19,5\%$ ). Ambos os gráficos das figuras foram plotados na mesma escala vertical, visando a melhor visualização do comparativo entre os resultados obtidos para cada uma das cales.

Figura 4.8 – Variação da resistência à compressão simples em relação à quantidade de cal das amostras com 25% de cinza volante para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.



(a)



(b)

Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 4.8 verifica-se que ocorre um aumento linear da RCS tanto para as misturas com cal dolomítica, quanto para as misturas com cal de casca de ovos. Entretanto, verifica-se que para a cal dolomítica a RCS tem um crescimento linear bastante contínuo, enquanto a RCS para as misturas com cal de casca de ovos mostrou mais variabilidade, especialmente para os

valores de  $\gamma_d$  de 1,5 g/cm<sup>3</sup> e 1,7 g/cm<sup>3</sup>, resultando em um R<sup>2</sup> do ajuste linear entre 0,81 e 0,86, respectivamente.

Ao se comparar os valores de RCS das misturas com 25% de cinza com as misturas apenas com cal e com 12,5 % de cinza, observa-se que para a cal dolomítica, a adição de cinza ainda oferece ganhos de resistência, sendo mais evidentes para as misturas com os valores de  $\gamma_d$  de 1,5 e 1,6 g/cm<sup>3</sup>. Para as misturas com  $\gamma_d$  de 1,7 g/cm<sup>3</sup> e 3% de cal não é possível fazer uma avaliação em função da inconsistência no resultado encontrado. Já para  $\gamma_d$  de 1,7 g/cm<sup>3</sup> e a adição de 5% de cal observou-se um leve ganho de resistência em relação à mistura com 12,5 % de cinza e uma leve redução na RCS foi observada para a mistura com 7% de cal, em relação à mistura com 12,5% de cinza.

Por outro lado, as misturas com 25% de cinza e utilização da cal de casca de ovos em sua maioria demonstraram redução da RCS ao se comparar com as misturas com cal exclusivamente e com cal e 12,5% de cinzas. Assim como observado para as misturas com cal de casca de ovos e 12,5% de cinza apenas para o  $\gamma_d$  de 1,5 g/cm<sup>3</sup> verificou-se um leve acréscimo na resistência em relação às misturas anteriores. Para os demais casos, a adição de 25% de cinza levou à redução da RCS. Uma análise mais detalhada do efeito da cinza sobre a RCS será apresentada no capítulo 4.2.2 deste trabalho.

Conforme demonstra a Figura 4.6, apesar do valor da RCS das misturas com cal de casca de ovos, em sua maioria, ter sido inferior aos valores das misturas anteriormente avaliadas, os valores ainda superam os valores da RCS obtidos para as misturas com cal dolomítica. Por exemplo, para um mesmo  $\gamma_d$ , a RCS obtida com 3% de adição de cal de casca de ovos é similar a RCS obtida com a adição de 7% da cal dolomítica comercial.

Com base nas equações das retas de ajuste linear da RCS, apresentadas na Figura 4.8, observa-se que para a cal dolomítica há um incremento no coeficiente angular da reta com o aumento do valor de  $\gamma_d$ . Tal fato evidencia o maior ganho de resistência com o acréscimo da porcentagem de cal em misturas mais densas (maior grau de compactação). Já para a cal de casca de ovos também se observou um aumento no coeficiente angular da reta que definiu as resistências para os valores de  $\gamma_d$  de 1,5 g/cm<sup>3</sup> em relação à reta que definiu as resistências para as misturas com  $\gamma_d$  de 1,6 g/cm<sup>3</sup>. Para as resistências correspondentes às misturas com  $\gamma_d$  de 1,7 g/cm<sup>3</sup> verificou-se uma leve queda no valor do coeficiente angular da reta. No entanto, tal ocorrência pode estar relacionada à maior dispersão dos valores de resistência obtidos para o  $\gamma_d$  de 1,7 g/cm<sup>3</sup>, não sendo possível afirmar com precisão se poderia estar ocorrendo uma redução

de ganho de resistência pelo acréscimo de cal com o  $\gamma_d$  de 1,7 g/cm<sup>3</sup>. Este comportamento também foi verificado para as misturas de solo exclusivamente com a cal de casca de ovos.

#### 4.2.2 Efeito da adição de cinza

Nos itens a seguir são avaliados os valores de RCS comparativamente entre as misturas realizadas com cada tipo de cal e valores de  $\gamma_d$ , analisando os efeitos na RCS da adição de 12,5% e 25% de cinza volante às misturas de solo-cal.

##### 4.2.2.1 Misturas com cal dolomítica

A Tabela 4.7 apresenta um resumo de todos os resultados obtidos para os ensaios de RCS das misturas com solo, cal dolomítica e cinza volante, a partir dos dados constantes na Tabelas A.1, A.3 e A.5 do anexo A, usando a média dos três corpos de prova rompidos para cada mistura.

Tabela 4.7: RCS média das misturas de solo e cal dolomítica.

Dados Gerais das misturas		Teor de cinza volante (%)					
		0		12,5		25	
$L$ (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$L_v$ (%)	RCS (kPa)	$L_v$ (%)	RCS (kPa)	$L_v$ (%)	RCS (kPa)
3	1,5	1,69	90,8	1,50	126,3	1,36	180,9
5	1,5	2,74	205,9	2,46	317,7	2,23	368,8
7	1,5	3,82	390,0	3,39	472,5	3,07	687,0
3	1,6	1,79	196,0	1,59	225,9	1,44	378,7
5	1,6	2,96	372,2	2,62	550,0	2,37	679,0
7	1,6	4,04	723,2	3,60	901,5	3,26	931,8
3	1,7	1,88	392,1	1,68	444,7	1,53	351,3*
5	1,7	3,09	662,6	2,77	835,9	2,55	869,2
7	1,7	4,27	1108,1	3,85	1337,8	3,47	1259,0

Fonte: elaborado pelo autor.

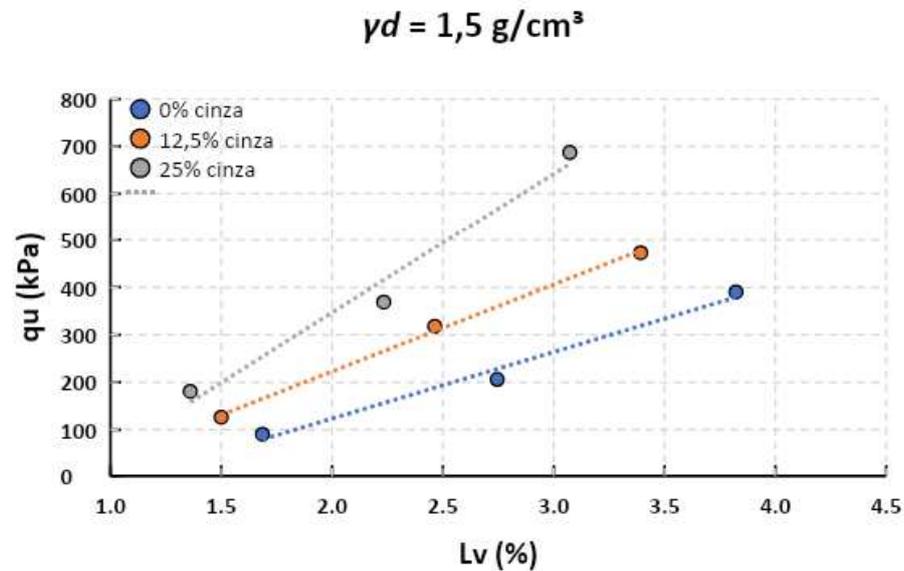
*Legenda: \*Possível problema da determinação da RCS desta mistura*

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.7 evidencia-se o comportamento já introduzido no item anterior. Verifica-se que, de modo geral, o acréscimo de cinza nas misturas eleva o valor da RCS.

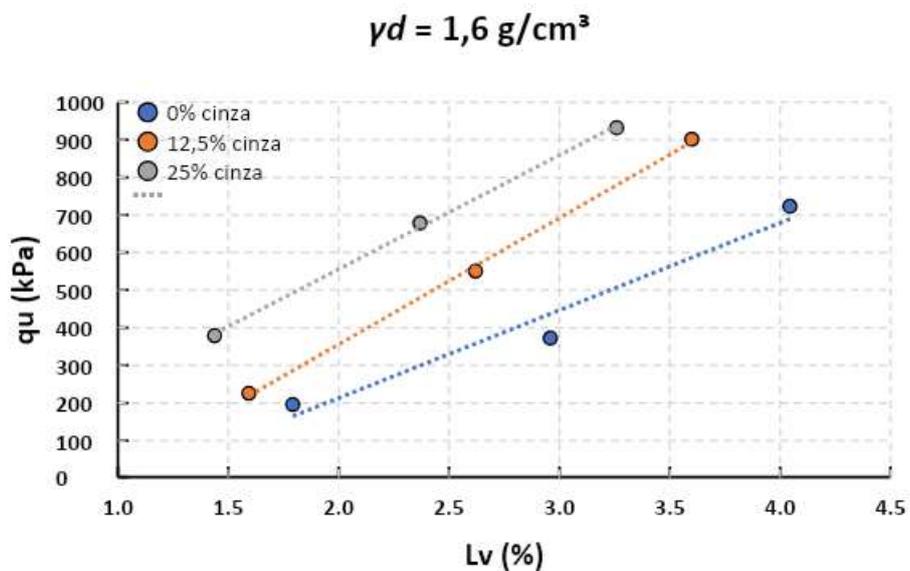
Na Figura 4.9, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função do teor volumétrico de cal dolomítica ( $L_v$ ), para 28 dias de cura e para os três valores de  $\gamma_d$  ensaiados. Cada curva possui um mesmo teor de cinza volante (0%,

12,5% e 25%) e todos os corpos de prova foram moldados com o mesmo teor de umidade ( $\omega = 19,5\%$ ). A escolha do índice  $L_v$  em detrimento de  $L$  deve-se ao fato de que o teor de cal é calculado em função da quantidade de solo. Dessa forma, aumentando-se o teor de cinza, diminui-se o volume de solo e, conseqüentemente, o total de cal utilizado. Tal fato contribuirá para uma melhor avaliação e compreensão dos efeitos da cinza sobre os valores da RCS.

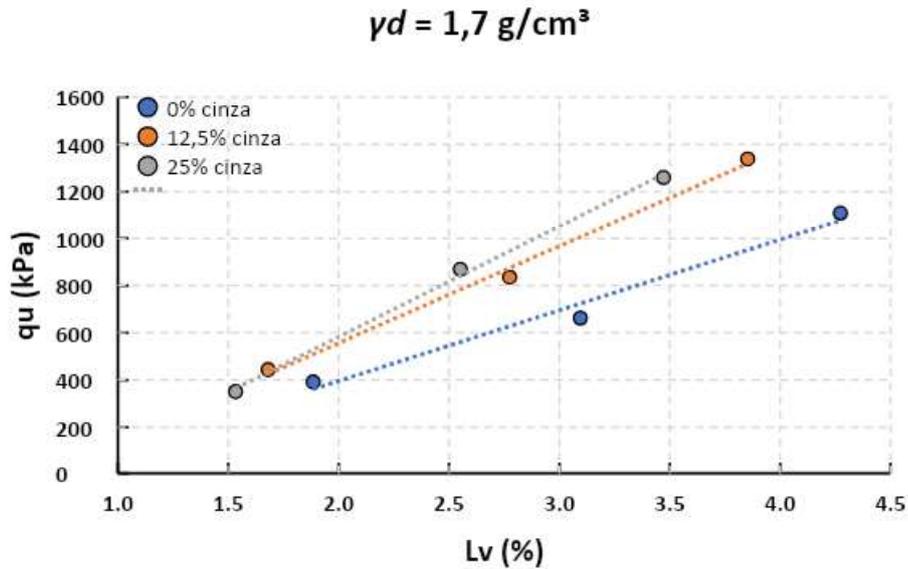
Figura 4.9 – Efeito do teor volumétrico de cal dolomítica nas misturas com 0%, 12,5% e 25% de cinza volante para os  $\gamma_d$  de (a) 1,5 g/cm<sup>3</sup>, (b) 1,6 g/cm<sup>3</sup> e (c) 1,7 g/cm<sup>3</sup>.



(a)



(b)



(c)

Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 4.9 é possível observar que para as misturas de solo e cal dolomítica, a adição de cinza volante produz um aumento na RCS se comparado com as misturas de solo-cal sem cinza. Observa-se que o aumento da RCS com a adição de cinza é linear em função do teor de cal volumétrico ( $L_v$ ). Além disso, verifica-se que o coeficiente angular das retas de ajuste linear das misturas com cinza é consideravelmente superior ao coeficiente angular da reta de ajuste linear da mistura de solo cal, exclusivamente. Tal fato evidencia a contribuição positiva da adição da cinza na RCS das misturas. Pode-se verificar, ainda, que o acréscimo de resistência promovido pela adição da cinza é, proporcionalmente maior, quanto menor for o  $\gamma_d$  da mistura. Para os valores de  $\gamma_d$  de 1,5 e 1,6 g/cm<sup>3</sup> a inclinação das retas de resistência são mais pronunciadas em relação à inclinação das retas que definem o comportamento da RCS para as misturas de solo cal exclusivamente.

Em análise aos resultados apresentado, pode-se afirmar que para os teores de cinza volante estudados, a mistura que apresenta maiores valores de RCS é a com maior teor de cinza (25%), assim como menores teores volumétricos de cal, considerando as mesmas condições de  $\gamma_d$  e L nas misturas sem cinza e com 12,5% de cinza. A diferença da RCS em função dos teores de cinza diminui com o aumento de  $\gamma_d$ . Para o maior  $\gamma_d$  (1,7 g/cm<sup>3</sup>), os valores da RCS para as misturas com 12,5% e 25% de cinza volante são praticamente os mesmos para os mesmos teores de cal, embora o teor volumétrico de cal para a mistura com 25% de cal seja menor. Salienta-

se, no entanto, que para a mistura de  $1,7 \text{ g/cm}^3$  tem-se o registro anômalo de RCS que não permite uma avaliação mais rigorosa para esta mistura.

O aumento da RCS das amostras com cinza volante em relação às amostras sem cinza volante evidencia a contribuição da cinza no ganho de RCS do solo tratado com a cal dolomítica.

Os resultados encontrados sobre o aumento de resistência causado pelo aumento dos teores de cal condizem com outros estudos sobre o tema para ambas as cales (Dalla Rosa, 2009; Consoli *et al.*, 2014a, Consoli *et al.*, 2016; Deepak *et al.*, 2015).

#### 4.2.2.2 *Misturas com cal de casca de ovo*

A Tabela 4.8 apresenta um resumo de todos os dos resultados obtidos para os ensaios de RCS das misturas com solo, cal de casca de ovo e cinza volante, a partir dos dados constantes na Tabelas A.2, A.4 e A.6 do Apêndice A, usando a média dos três corpos de prova rompidos para cada mistura.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.8 evidencia-se o comportamento já introduzido no item anterior. Ao se comparar os valores de RCS obtidos para as misturas unicamente de solo e cal com os valores obtidos para as misturas de solo, cal e 12,5% de cinza, verifica-se que a RCS obtida para as misturas com 12,5% de cinza em sua grande maioria foi inferior à RCS obtida para as misturas feitas unicamente com solo e cal de cascas de ovos. Apenas os teores de 3 e 5% de cal de casca de ovos, para um  $\gamma_d$  de  $1,5 \text{ g/cm}^3$  e 12,5% de cinzas apresentaram um leve acréscimo na RCS em relação à mistura de solo e cal de casca de ovos exclusivamente. Para as misturas com 25% de cinza e utilização da cal de casca de ovos em sua maioria demonstrou uma redução da RCS ao se comparar com as misturas com cal exclusivamente e com cal e 12,5% de cinzas. Assim como observado para as misturas com cal de casca de ovos e 12,5% de cinza apenas para o  $\gamma_d$  de  $1,5 \text{ g/cm}^3$  verificou-se um leve acréscimo na resistência em relação às misturas anteriores. Para os demais casos, a adição de 25% de cinza levou à redução da RCS.

Tabela 4.8: RCS média das misturas de solo e cal de casca de ovo.

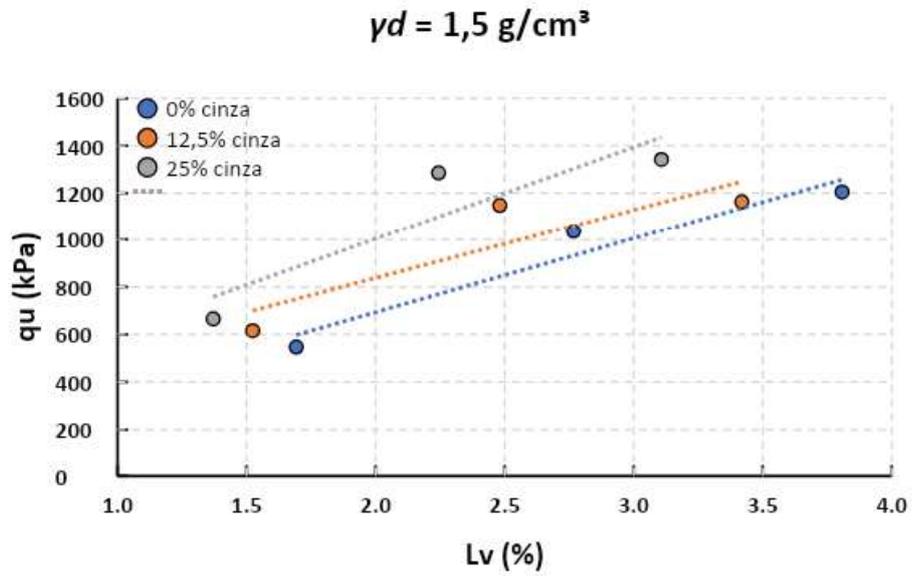
Dados Gerais das misturas		Teor de cinza volante (%)					
		0		12,5		25	
<i>L</i> (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	<i>L<sub>v</sub></i> (%)	RCS (kPa)	<i>L<sub>v</sub></i> (%)	RCS (kPa)	<i>L<sub>v</sub></i> (%)	RCS (kPa)
3	1,5	1,69	546,7	1,52	615,7	1,37	665,2
5	1,5	2,77	1036,0	2,48	1147,5	2,24	1285,5
7	1,5	3,81	1204,5	3,42	1162,9	3,11	1342,0
3	1,6	1,81	1158,5	1,61	1136,6	1,46	1117,8
5	1,6	2,96	2027,1	2,64	1803,9	2,38	1690,4
7	1,6	4,04	2278,4	3,65	2271,1	3,29	2172,5
3	1,7	1,92	2153,0	1,70	1519,6	1,55	1430,4
5	1,7	3,13	2795,4	2,79	2341,9	2,54	2190,4
7	1,7	4,28	3090,3	3,88	2770,6	3,50	2333,2

Fonte: elaborado pelo autor.

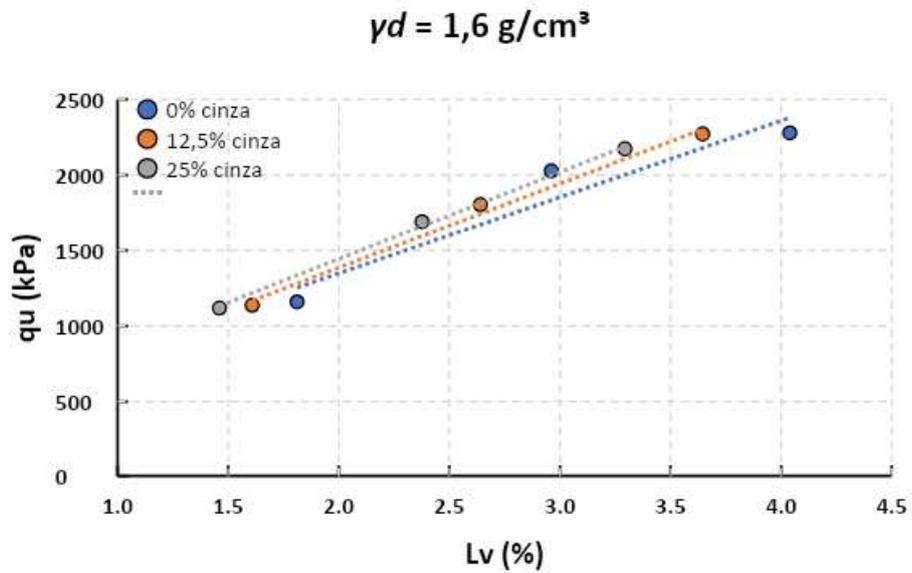
Na Figura 4.10, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função do teor volumétrico de cal de casca de ovo ( $L_v$ ), para 28 dias de cura, para os três valores de  $\gamma_d$  ensaiados. Cada curva possui um mesmo teor de cinza volante (0%, 12,5% e 25,0%) e todos os corpos de prova foram moldados com o mesmo teor de umidade ( $\omega = 19,5\%$ ).

Através da análise da Figura 4.10 é possível observar que há uma dispersão bem mais pronunciada nos valores da RCS das misturas, quando comparados os resultados aos encontrados para as misturas com cal dolomítica. Observa-se um aumento linear de resistência em função do  $L_v$  para cada um dos valores de  $\gamma_d$  estudados. No entanto, em alguns casos com valores de  $R^2$  entre 0,70 e 0,80, como verificado nos resultados para o  $\gamma_d$  de 1,5 g/cm<sup>3</sup>. Ao se aumentar o valor de  $\gamma_d$  dos corpos de prova, a adição da cinza volante às misturas tende à diminuir o valor da RCS. Observa-se que para as misturas com  $\gamma_d$  de 1,5 g/cm<sup>3</sup> ocorre um pequeno incremento de RCS com a adição de cinza, sendo este incremento de 10 a 20% em relação à mistura apenas com cal. Destaca-se que para este valor de  $\gamma_d$  os resultados apresentaram a maior variabilidade, fato que pode fazer com que o pequeno ganho de resistência observado seja apenas resultado de variabilidade natural esperada dentro do processo experimental. Para o caso das misturas com  $\gamma_d$  de 1,6 g/cm<sup>3</sup> os valores de resistência para todas as misturas praticamente foram iguais, com variação média da ordem de 5 a 10% em relação às misturas somente com cal, para cada teor de cinza respectivamente. Já para as misturas com  $\gamma_d$  de 1,7 g/cm<sup>3</sup> houve um decréscimo considerável da RCS, com variação média de 20 a 28% em relação às misturas somente com cal, para cada teor de cinza respectivamente.

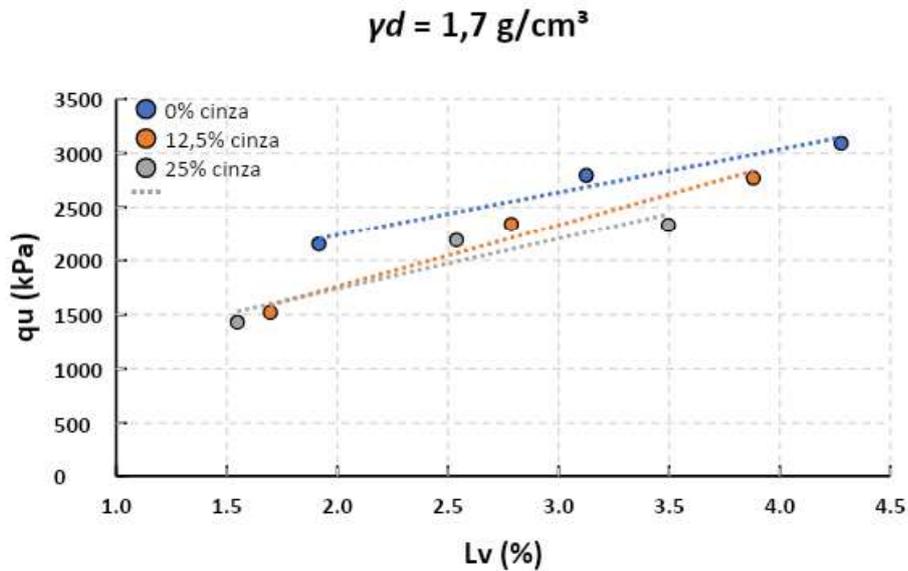
Figura 4.10 – Efeito do teor volumétrico de cal de casca de ovo nas misturas com 0%, 12,5% e 25% de cinza volante para os  $\gamma_d$  de (a) 1,5 g/cm<sup>3</sup>, (b) 1,6 g/cm<sup>3</sup> e (c) 1,7 g/cm<sup>3</sup>.



(a)



(b)



(c)

Fonte: elaborado pelo autor.

Considerando que nas misturas apenas com cal verificou-se um acréscimo da RCS com o aumento de  $\gamma_d$ , pode-se afirmar que para as misturas de solo com cal de casca de ovos o acréscimo da cinza volante reduz o teor volumétrico da cal, cujo efeito é tão prejudicial que mesmo a adição da cinza e o incremento na compactação não são capazes de auxiliar no ganho de RCS. Além disso, com a redução da quantidade de solo na mistura, a presença de argilomineral é reduzida o que diminui o efeito das reações pozolânicas.

Não foi possível identificar na presente pesquisa uma razão clara para a redução expressiva da RCS para o  $\gamma_d$  de  $1,7 \text{ g/cm}^3$  das misturas de cinza com cal de casca de ovos, já que este comportamento não foi observado para a cal dolomítica. Eventualmente a maior proximidade entre as partículas possa ter desencadeado alguma reação ou formação de algum produto que possa ter tido efeito deletério sobre a RCS.

#### 4.2.3 Efeito da porosidade

Nos itens a seguir são analisados os efeitos da porosidade na RCS das misturas de solo e cal e solo, cal e cinza volante, para ambas as cales.

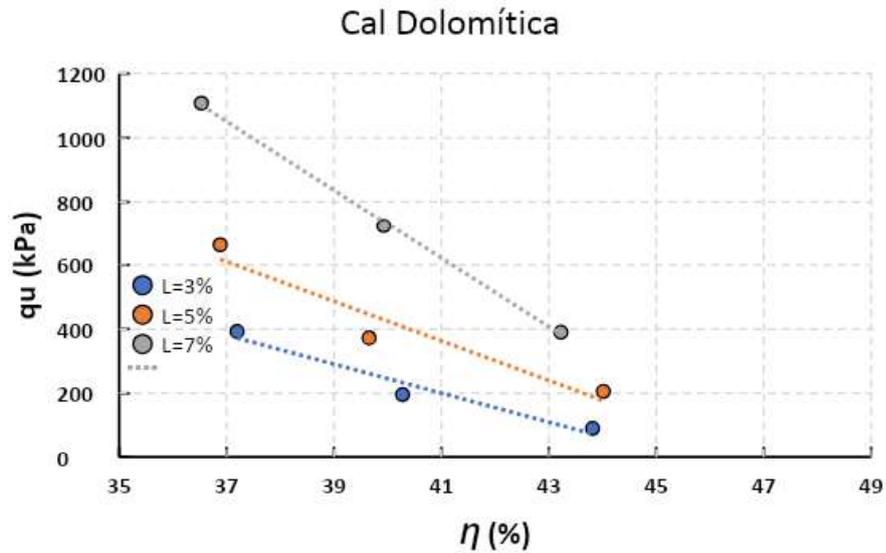
##### 4.2.3.1 Misturas solo e cal

Na Figuras 4.9, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da RCS em função da porosidade das misturas de solo-cal compactadas, para as cales dolomítica e de casca de ovos, respectivamente. Cada curva possui o mesmo teor de cal (3%, 5% e 7%) e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega = 19,5\%$ ). Os gráficos foram mantidos na mesma escala para um melhor comparativo entre os resultados obtidos pelas duas cales.

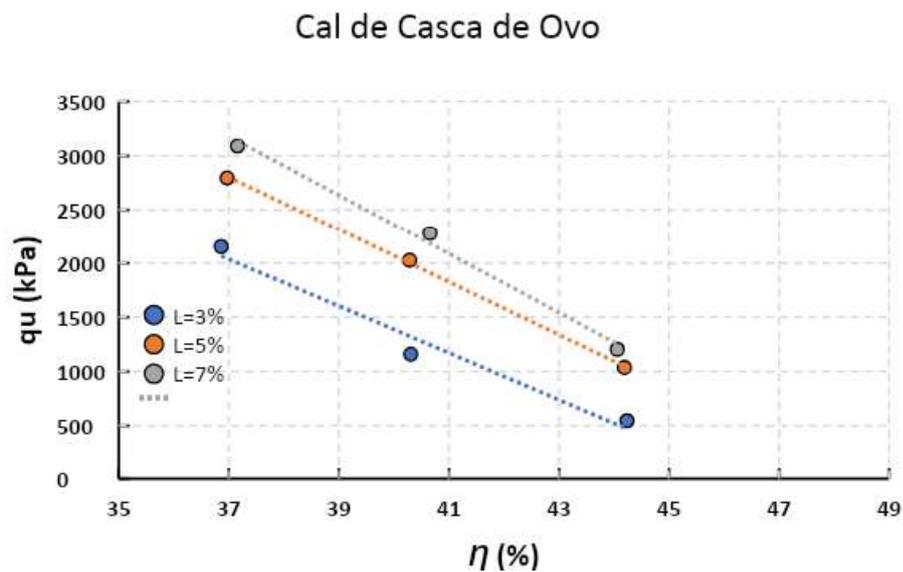
Na Figura 4.11 verifica-se que, independentemente da quantidade e do tipo de cal utilizado, a redução na porosidade da mistura compactada promove um aumento exponencial da RCS das misturas de solo-cal, conforme esperado.

A variação da RCS pela porosidade foi maior para a cal dolomítica do que para a cal de casca de ovo, e quanto menor o teor de cal, maior a variação. Para a cal dolomítica, a redução de 44% de porosidade ( $\gamma_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$ ) para 37% ( $\gamma_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$ ) aumentou 4,3 vezes para as misturas com 3% de cal e 2,8 vezes para as misturas com 7% de cal. Para a cal de casca de ovo, a redução de 44% de porosidade ( $\gamma_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$ ) para 37% ( $\gamma_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$ ) aumentou 3,9 vezes para as misturas com 3% de cal e 2,5 vezes para as misturas com 7% de cal.

Figura 4.11 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 0% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.



(a)



(b)

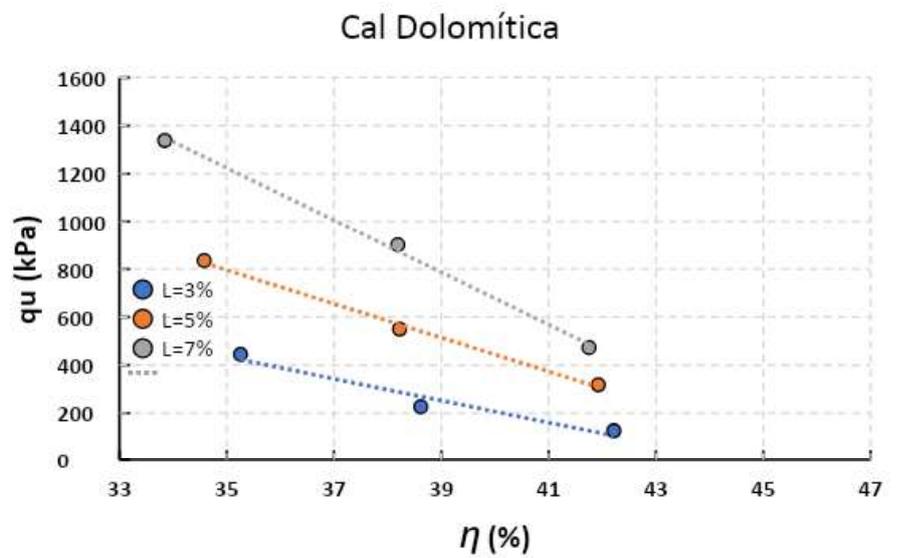
Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.2.3.2 Misturas de solo e cal com 12,5% de cinza volante

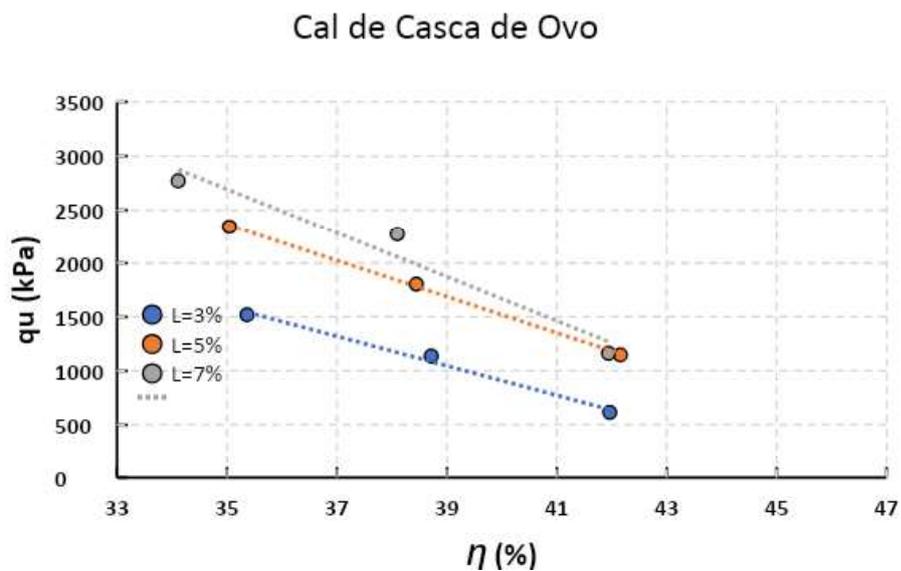
Nas Figuras 4.12, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da RCS em função da porosidade das misturas de solo-cal compactadas, para as cales dolomítica e de casca de

ovos, respectivamente, com 12,5% de cinza volante. Cada curva possui o mesmo teor de cal (3%, 5% e 7%) e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega = 19,5\%$ ). Os gráficos foram mantidos na mesma escala para um melhor comparativo entre os resultados obtidos pelas duas cales.

Figura 4.12 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 12,5% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.



(a)



(b)

Fonte: elaborado pelo autor.

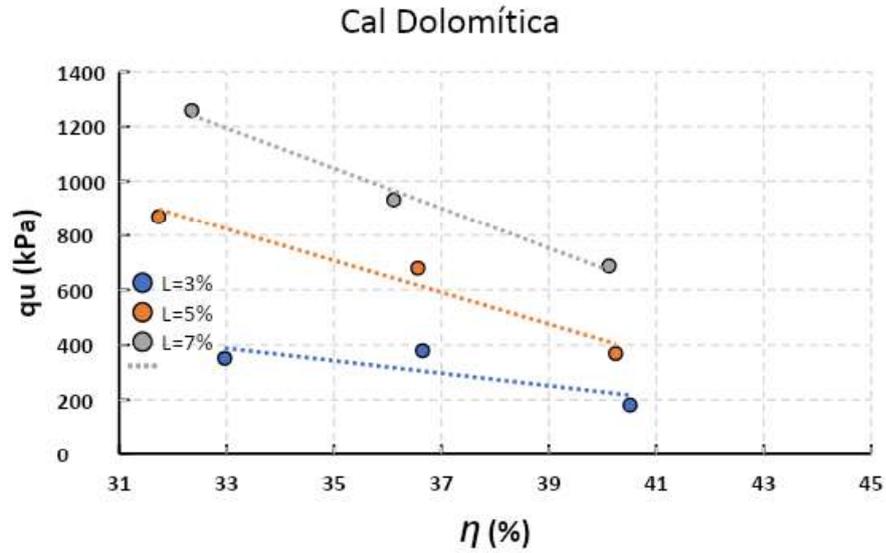
Através da análise da Figura 4.12 verifica-se que, para a cal dolomítica, a redução na porosidade da mistura compactada, com 12,5% de cinza, tem comportamento bastante similar à mistura apenas de solos e cal, sendo que a redução da porosidade promove um aumento exponencial da RCS das misturas. Já para a cal de casca de ovos, também se observa um comportamento geral de aumento da RCS com a redução da porosidade, no entanto, este efeito vai tendendo à uma estabilização com o acréscimo do teor de cal, principalmente para as maiores porosidades. Tal comportamento dá indícios de que a adição de 12,5% de cinza não geraria acréscimos de RCS para teores de cal da casca de ovos superiores a 5%.

#### 4.2.3.3 *Misturas solo e cal com 25% de cinza volante*

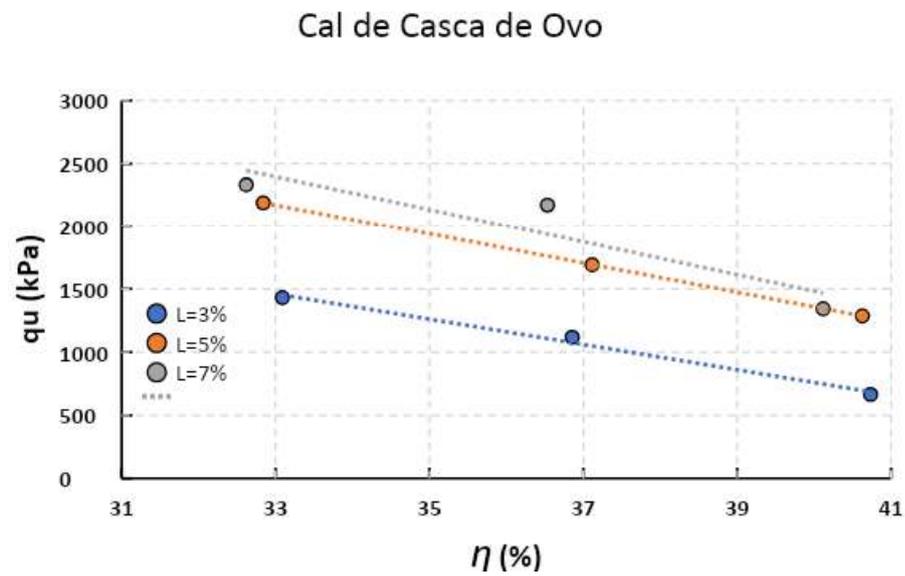
Nas Figuras 4.13, são apresentadas as curvas de ajuste da variação da RCS em função da porosidade das misturas de solo-cal compactadas, para as cales dolomítica e de casca de ovos, respectivamente, com 25% de cinza volante. Cada curva possui o mesmo teor de cal (3%, 5% e 7%) e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega = 19,5\%$ ). Os gráficos foram mantidos na mesma escala para um melhor comparativo entre os resultados obtidos pelas duas cales.

Através da análise da Figura 4.13 verifica-se que, para a cal dolomítica, a redução na porosidade da mistura compactada, com 25% de cinza, tem comportamento bastante similar à mistura apenas de solos e cal e solo, cal e 12,5% de cinza. Verifica-se neste caso que a redução da porosidade promove um aumento exponencial da RCS das misturas. Já para a cal de casca de ovos, também se observa um comportamento geral de aumento da RCS com a redução da porosidade, no entanto, assim como observado para a adição de 12,5% de cinza, este efeito vai tendendo à uma estabilização com o acréscimo do teor de cal. Tal comportamento dá indícios de que a adição de 25% de cinza também não geraria acréscimos de RCS para teores de cal da casca de ovos superiores a 5%.

Figura 4.13 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade das amostras com 25% de cinza volante ensaiadas com 28 dias de cura para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.



(a)



(b)

Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.2.4 Efeito da relação porosidade/teor volumétrico de cal

Nos itens a seguir é analisada a relação porosidade/teor volumétrico na RCS das misturas de solo e cal e solo, cal e cinza volante, para ambas as cales.

##### 4.2.4.1 Misturas solo e cal

Na Figura 4.14 é apresentada a RCS em função da porosidade/teor volumétrico de cal ( $\eta/L_V$ ) das misturas de solo e cal, para as cales dolomítica e de casca de ovos, respectivamente, para os valores de  $\gamma_d$  estudados. Cada curva possui o mesmo teor de cal (3%, 5% e 7%) e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega = 19,5\%$ ).

Pode-se observar na Figura 4.14 uma dispersão dos pontos das misturas, se considerarmos os efeitos da quantidade de cal e da porosidade, em torno de uma tendência exponencial.

Verifica-se claramente que pontos com mesma relação vazios/cal obtidos de modos diferentes (um por densificação e outro por aumento do teor de cal) apresentam resistências distintas, sendo que os pontos com menor porosidade e maior quantidade de cal atingem resistências maiores.

Assumindo que uma variação no volume de vazios exigiria uma variação proporcional no volume de cal para contrabalançar a perda ou ganho na resistência, em termos matemáticos, tem-se que:

$$\frac{\eta}{L_V} = K \text{ e } \frac{\eta + \Delta\eta}{L_V + \Delta L_V} = K, \text{ então } \Delta L_V = \frac{L_V}{\eta} \times \Delta\eta \quad (6)$$

Onde:

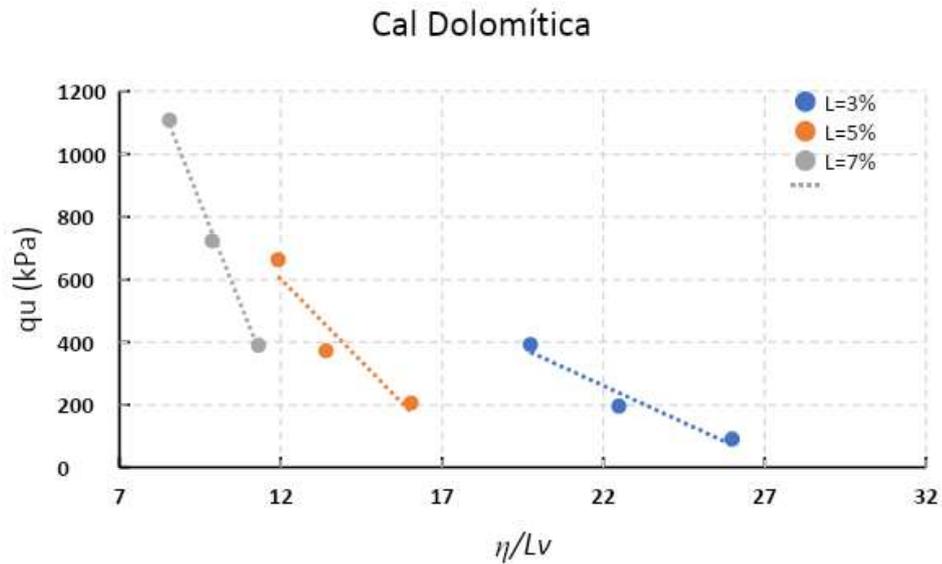
$\Delta\eta$  = variação na porosidade.

$\Delta L_V$  = variação no teor volumétrico de cal.

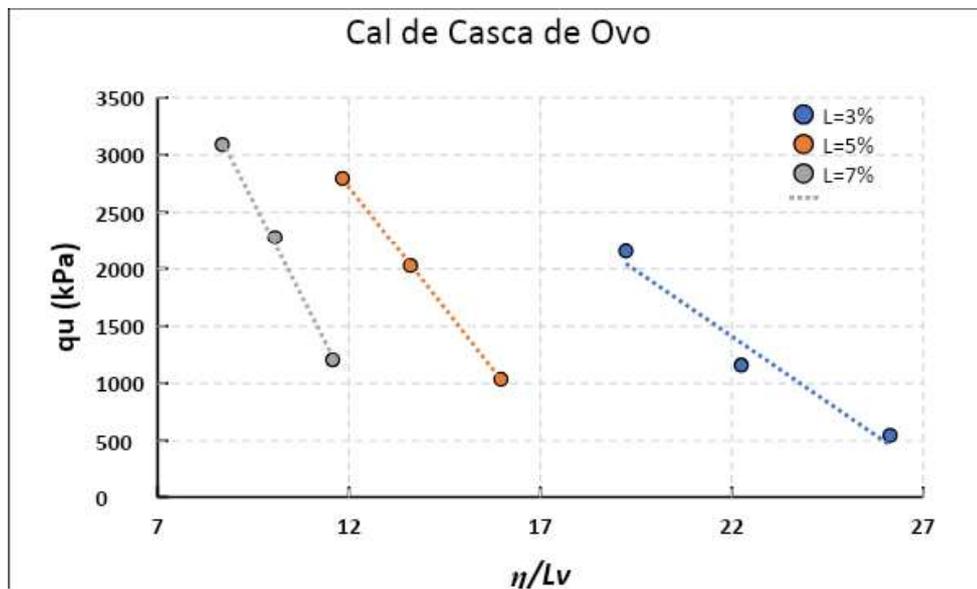
$K$  = constante.

Essa tendência foi verificada para amostras de solo melhoradas com cimento e com cal nos estudos de Larnach (1960), Foppa (2005), Lopes Junior (2007), Dalla Rosa (2009), Consoli *et al.* (2016c) e Consoli *et al.* (2015).

Figura 4.14– Relação vazios/cal para as amostras com 0% de cinza volante com 28 dias de cura para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.



(a)



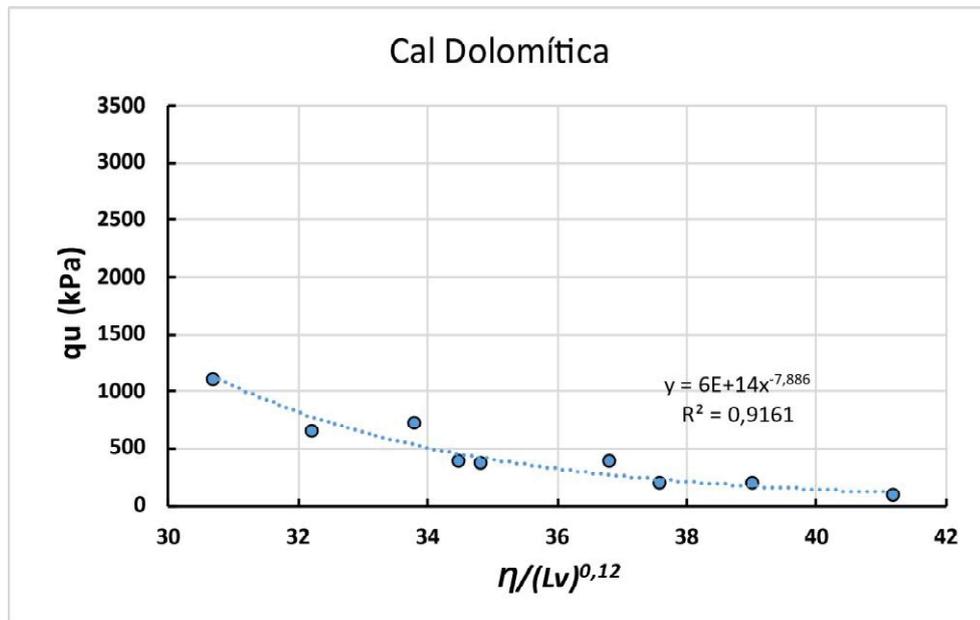
(b)

Fonte: elaborado pelo autor.

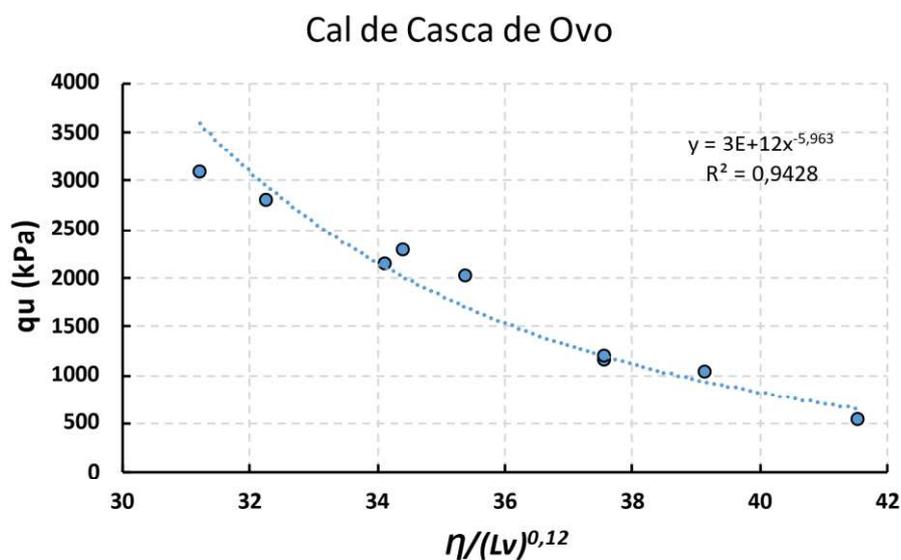
Uma maneira de compatibilizarmos as taxas de variação das grandezas citadas é através da aplicação de uma potência sobre uma delas. Dessa forma, foi aplicado uma potência igual a 0,12 sobre o parâmetro  $L_v$ , proposto por Consoli *et al.* (2016c) para solos argilosos melhorados com cal, o que proporcionaria uma melhor compatibilização entre as taxas de variação, resultando num melhor ajuste para o fator  $\eta/L_v$ . A Figura 4.15 apresenta

a variação da RCS em relação ao fator  $\eta/(L_v)^{0,12}$ , para misturas de solo com teores de 3%, 5% e 7% de cal, com 28 dias de cura. Todos os corpos de prova apresentados na Figura 4.15 possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega = 19,5\%$ ), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

Figura 4.15 – Relação entre  $\eta/(L_v)^{0,12}$  e a RCS para as amostras de solo e cal com 28 dias de cura para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.



(a)



(b)

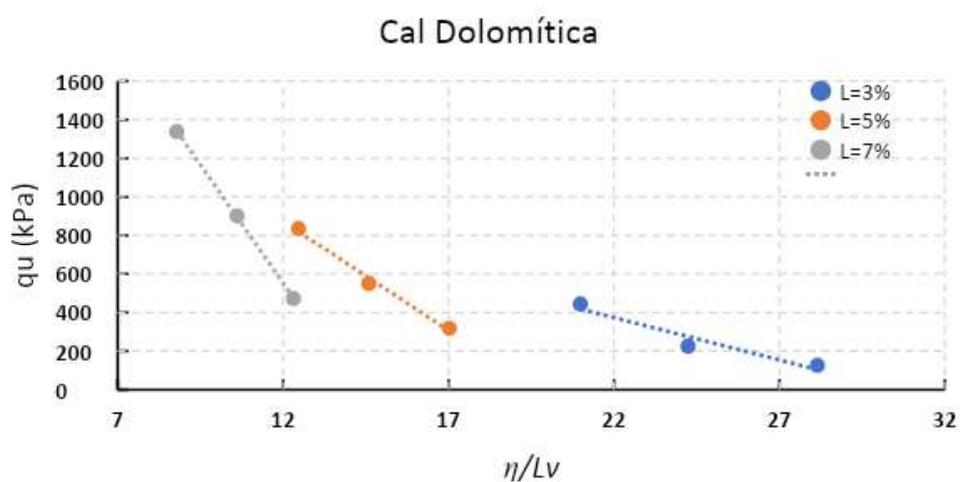
Fonte: elaborado pelo autor.

Pode-se observar uma boa correlação entre  $\eta/(L_v)^{0,12}$  à RCS do solo-cal. Foi utilizado no ajuste curva tipo potência, a qual apresentou melhores coeficientes de correlação  $R^2$ .

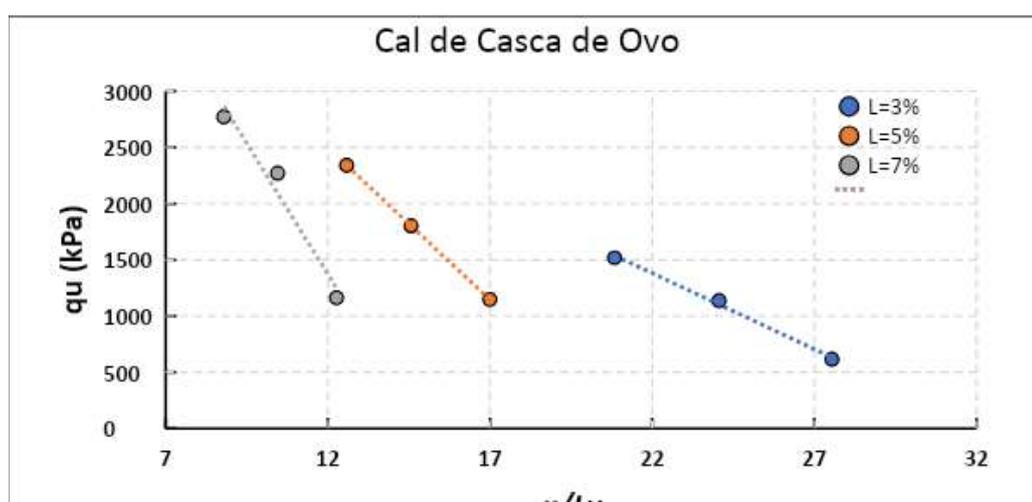
#### 4.2.4.2 Misturas solo+cal+12,5% de cinza

Na Figura 4.16 é apresentada a RCS em função da porosidade/teor volumétrico de cal ( $\eta/L_v$ ) das misturas de solo e cal, para as cales dolomítica e de casca de ovos com 12,5% de cinza volante, respectivamente, para os  $\gamma_d$  estudados. Cada curva possui o mesmo teor de cal (3%, 5% e 7%) e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega = 19,5\%$ ).

Figura 4.16 – Relação vazios/cal para as amostras com 12,5% de cinza volante com 28 dias de cura para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.



(a)

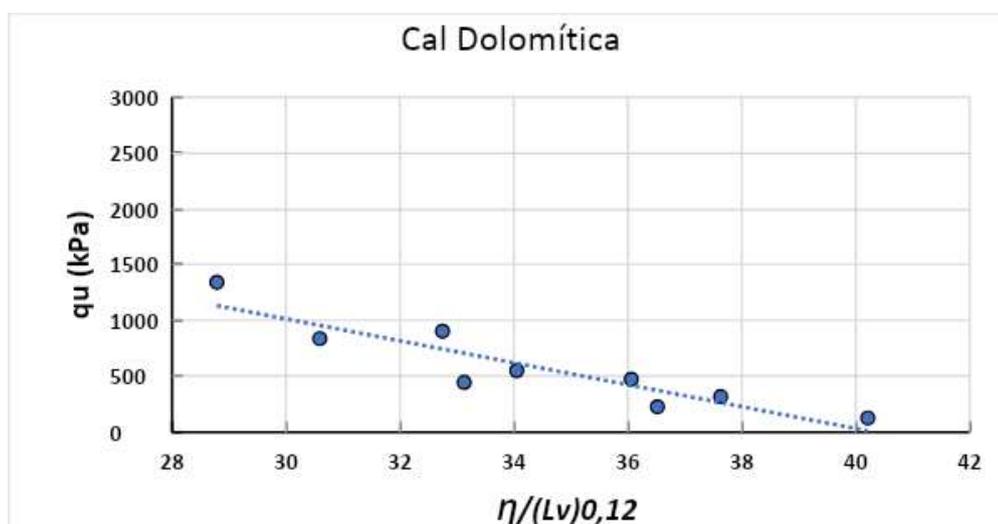


(b)

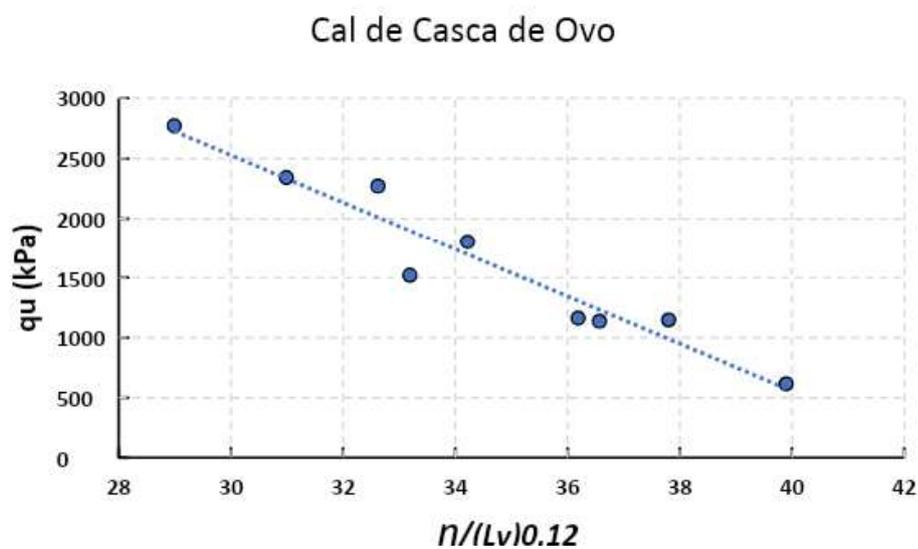
Fonte: elaborado pelo autor.

Assim como já comentando na avaliação da relação da RCS em função da porosidade/teor volumétrico de cal ( $\eta/L_v$ ) para as misturas somente com cal, observa-se na Figura 5.16 uma dispersão dos pontos das misturas, se considerado os efeitos da quantidade de cal e da porosidade, em torno de uma tendência exponencial. Como foi feito anteriormente, foi aplicada potência igual a 0,12 sobre o parâmetro  $L_v$ , buscando unificar os dados em uma mesma curva. A Figura 4.17 apresenta a variação da RCS em relação ao fator  $\eta/(L_v)^{0,12}$ , para amostras de solo e 12,5% de cinza, com teores de 3%, 5% e 7% de cal, com 28 dias de cura. Todos os corpos de prova apresentados na Figura 4.17 possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega = 19,5\%$ ), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

Figura 4.17 – Relação entre  $\eta/(L_v)^{0,12}$  e a RCS para as amostras com 12,5% de cinza volante com 28 dias de cura para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.



(a)



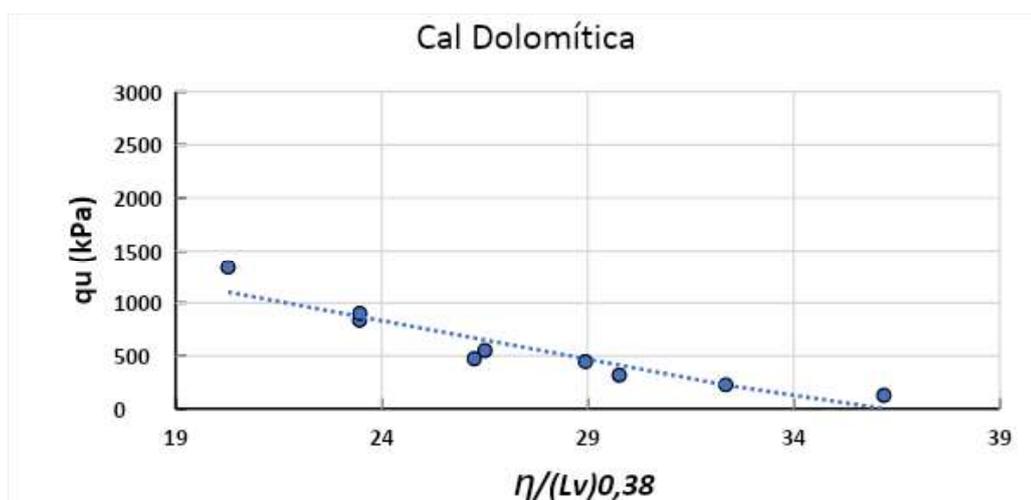
(b)

Fonte: elaborado pelo autor.

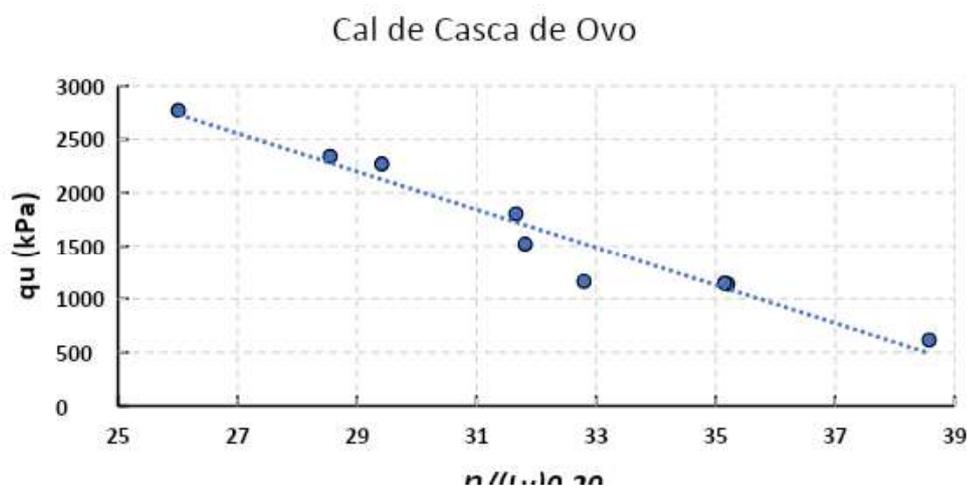
Pode-se observar uma razoável correlação entre  $\eta/(L_v)^{0,12}$  à RCS do solo-cal com 12,5% de cinza em estudo.

Buscando-se melhorar o coeficiente de correlação  $R^2$ , realizaram-se tentativas de ajuste do expoente até a obtenção do valor de  $R^2$  que mais se aproximasse de 1. Sendo assim, encontrou-se um expoente igual a 0,38 para a cal dolomítica e 0,20 para a cal de casca de ovo, conforme mostrado na Figura 4.18. Observa-se que apesar da nova tentativa de ajuste, os resultados obtidos com a cal de casca de ovos apresentam maior dispersão em relação à cal dolomítica. Observa-se que, ao aumentar o expoente de  $L_v$ , a RCS das misturas com cinza volante é mais dependente da porosidade do que do teor de cal, em relação às misturas sem cinza.

Figura 4.18 – Relação entre (a)  $\eta/(L_v)^{0,38}$  e a RCS para cal dolomítica e (b)  $\eta/(L_v)^{0,2}$  e a RCS para cal de casca de ovo para as amostras com 12,5% de cinza volante com 28 dias de cura.



(a)



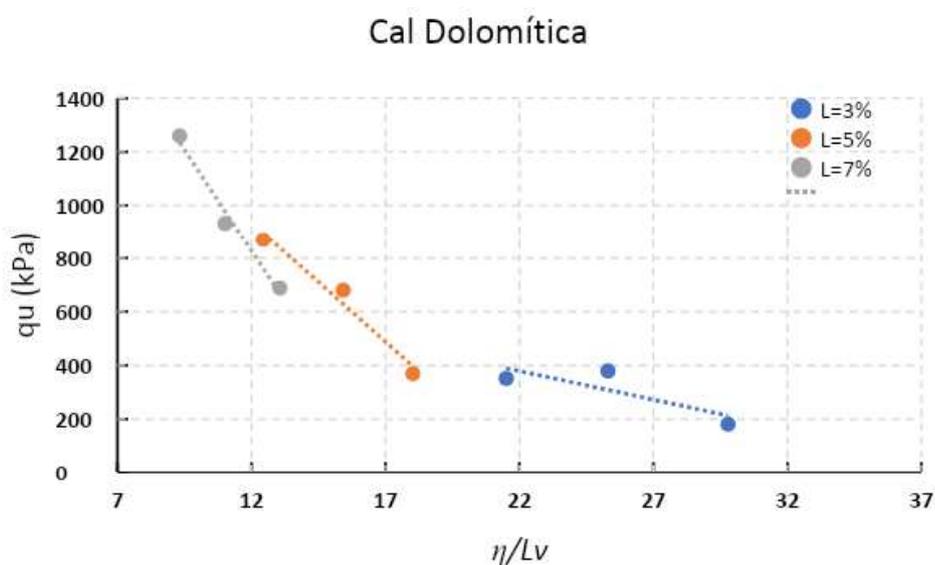
(b)

Fonte: elaborado pelo autor.

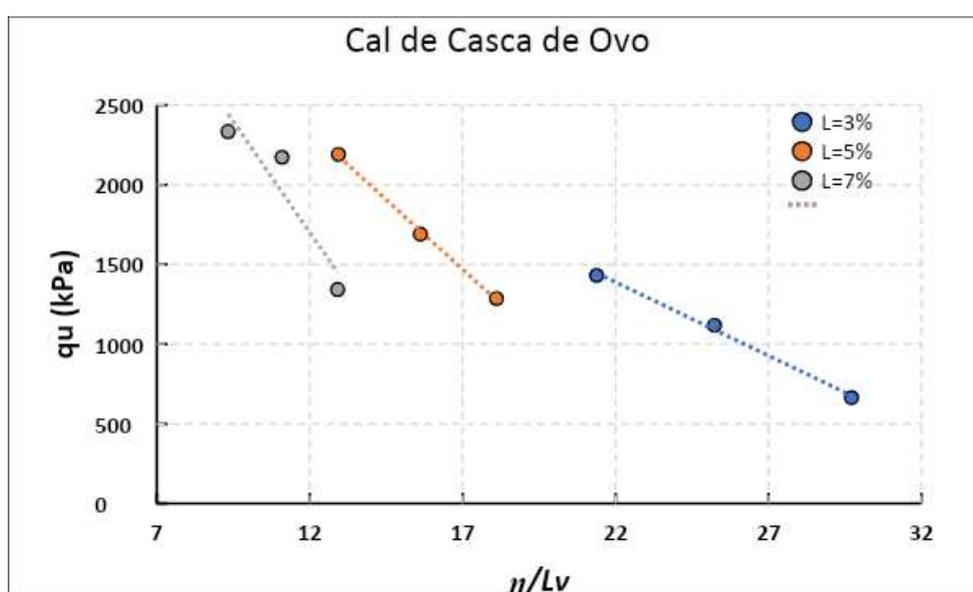
#### 4.2.4.3 Misturas solo+cal+25% de cinza

Na Figura 4.19 é apresentada a RCS em função da porosidade/teor volumétrico de cal ( $\eta/L_v$ ) das misturas de solo e cal, para as cales dolomítica e de casca de ovos com 25% de cinza volante, respectivamente, para os valores de  $\gamma_d$  estudados. Cada curva possui o mesmo teor de cal (3%, 5% e 7%) e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega = 19,5\%$ ).

Figura 4.19 – Relação vazios/cal para as amostras com 25% de cinza volante com 28 dias de cura para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.



(a)



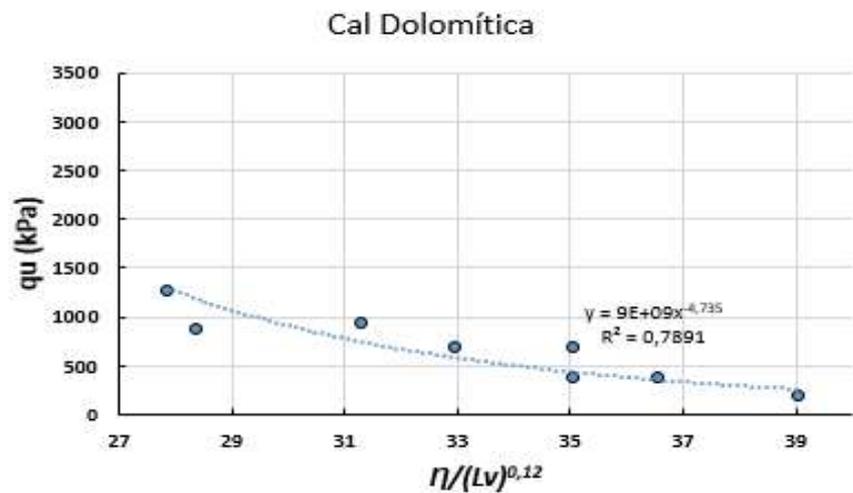
(b)

Fonte: elaborado pelo autor.

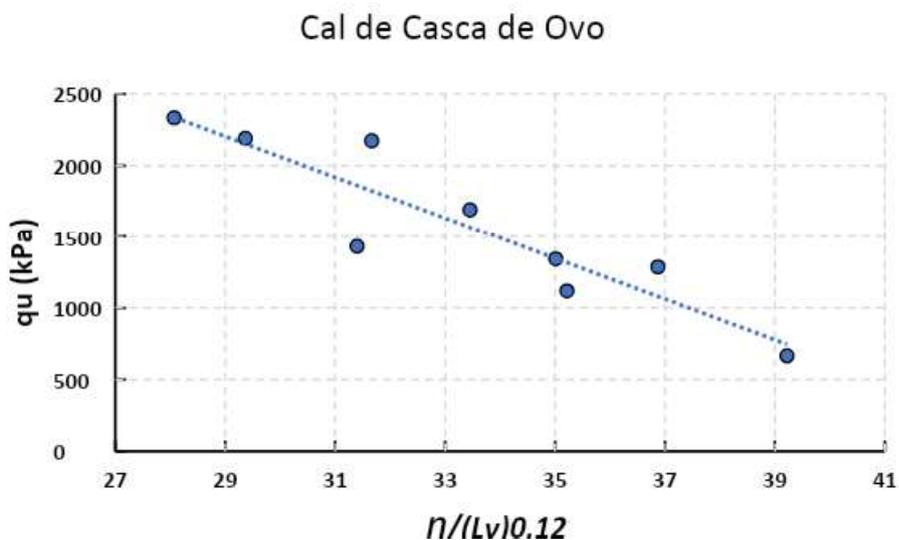
Como foi feito anteriormente, foi aplicada potência igual a 0,12 sobre o parâmetro  $L_v$ , buscando unificar os dados em uma mesma curva. A Figura 4.20 apresenta a variação da RCS em relação ao fator  $\eta/(L_v)^{0,12}$ , para amostras de solo e 25% de cinza, com teores de 3%, 5% e 7% de cal, com 28 dias de cura. Todos os corpos de prova apresentados na Figura 4.20 possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega = 19,5\%$ ), porém quantidades de cal e porosidades variadas.

Como o resultado da RCS para mistura com solo, cal dolomítica e 25% de cinza volante para o  $\gamma_d$  de  $1,7 \text{ g/cm}^3$  e  $L$  de 3% apresentou um valor de RCS anômalo, ele foi desconsiderado na elaboração da Figura 4.20.

Figura 4.20 – Relação entre  $\eta/(L_v)^{0,12}$  e a RCS para as amostras com 25% de cinza volante com 28 dias de cura para (a) cal dolomítica e (b) cal de casca de ovo.



(a)



(b)

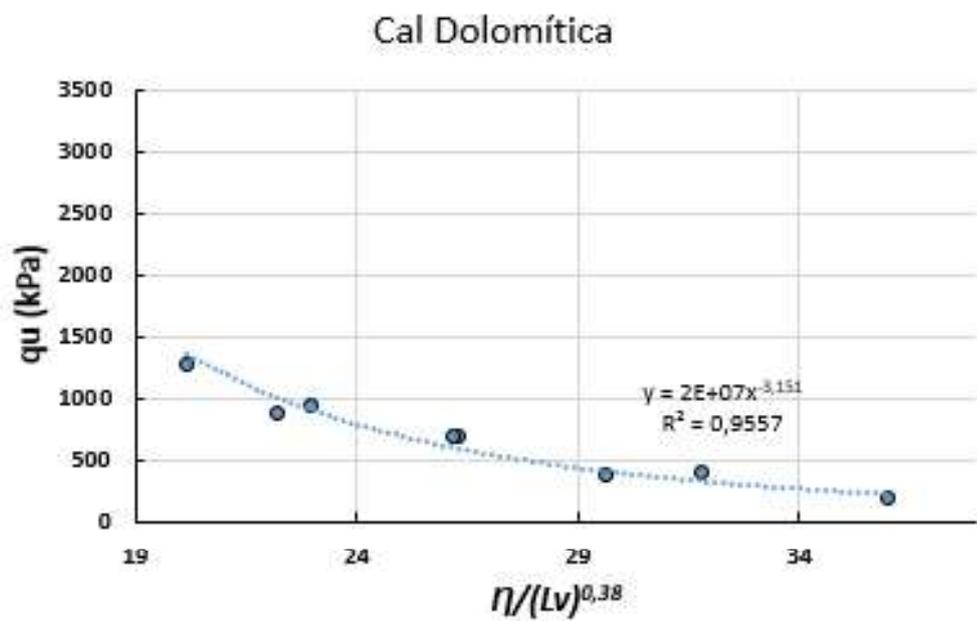
Fonte: elaborado pelo autor.

Pode-se observar uma razoável correlação entre  $\eta/(Lv)^{0,12}$  à RCS do solo-cal com 12,5% de cinza em estudo.

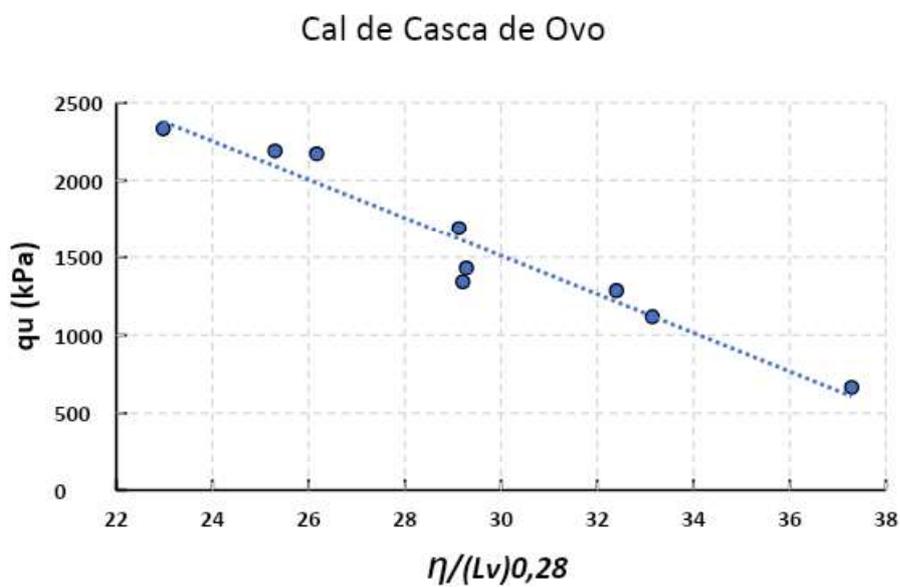
Buscando-se melhorar o coeficiente de correlação  $R^2$ , realizaram-se tentativas de ajuste do expoente até a obtenção do valor de  $R^2$  que mais se aproximasse de 1. Sendo assim, encontrou-se um expoente igual a 0,38 para a cal dolomítica e 0,28 para a cal de casca de ovo, conforme mostrado na Figura 4.21. Observa-se que apesar da nova tentativa de ajuste, os resultados obtidos com a cal de casca de ovos apresentam maior dispersão em relação à cal dolomítica. Consoli *et al.* (2016c) sugere que o índice 0,28 seja usado para misturas de solo-cimento.

Os resultados encontrados diferem de Consoli *et al.* (2011), nos quais as misturas com solo, cinza volante e cal apresentaram um  $R^2$  acima de 0,95 para o coeficiente 0,12.

Figura 4.21 – Relação entre (a)  $\eta/(Lv)^{0,38}$  e a RCS para cal dolomítica e (b)  $\eta/(Lv)^{0,28}$  e a RCS para cal de casca de ovo para as amostras com 25% de cinza volante com 28 dias de cura.



(a)



(b)

Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.2.5 Modos de ruptura

A Figura 4.23 mostra alguns corpos-de-prova de solo-cinza-cal submetidos à compressão simples.

Figura 4.23 – Corpos-de-prova submetidos à compressão simples



Fonte: elaborado pelo autor.

A ruptura observada nos ensaios de compressão simples realizados foi do modo frágil com a formação de um ou mais planos de ruptura bem definidos. Em geral, o ângulo formado entre o plano de ruptura e o plano onde atua a tensão principal maior foi de aproximadamente  $60^\circ$ , este comportamento também foi verificado nos resultados obtidos por Dalla Rosa (2009) e Lopes Junior (2007).

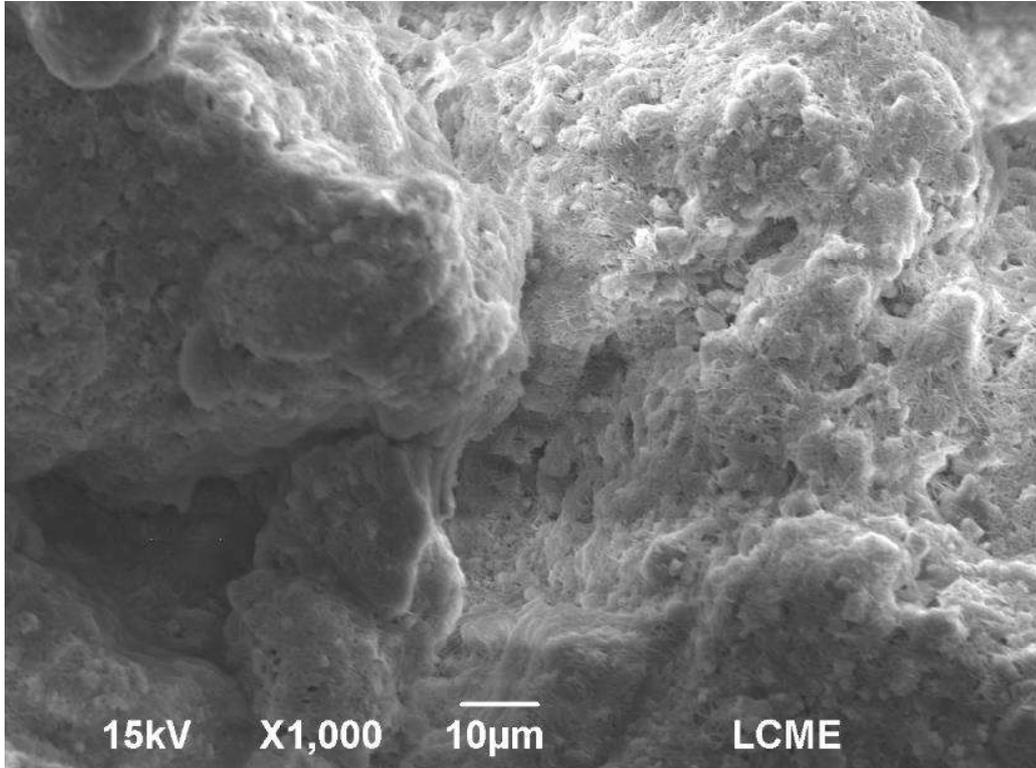
### 4.3 ENSAIO DE MICROSCOPIA

Para melhor entender as mudanças ocorridas no solo com a adição da cal dolomítica, da cal de casca de ovo e da cinza volante que levaram ao aumento da resistência mecânica do solo natural, foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Todas as amostras analisadas possuíam peso específico de  $1,6 \text{ g/cm}^3$ .

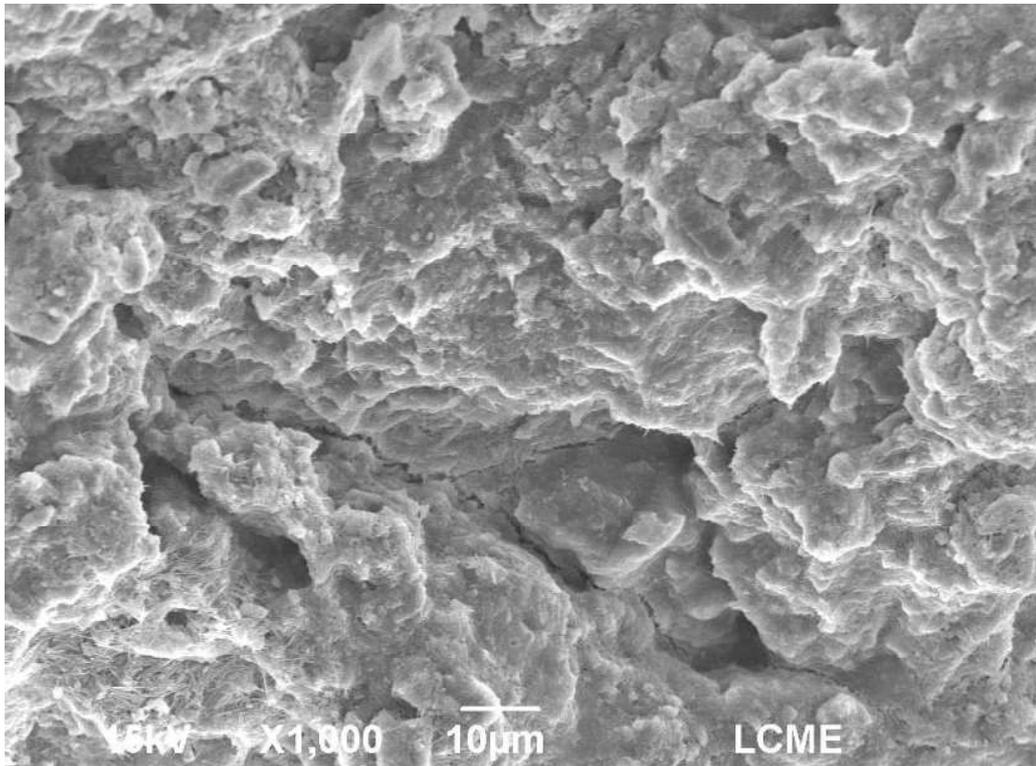
#### 4.3.1 Imagens de solo e misturas de solo+cal dolomítica e solo+cal de casca de ovo

A Figura 4.24 mostra as imagens das amostras de (a) solo, (b) mistura de solo com 7% de cal dolomítica e (c) mistura de solo com 7% de cal de casca de ovo ampliadas 1.000x.

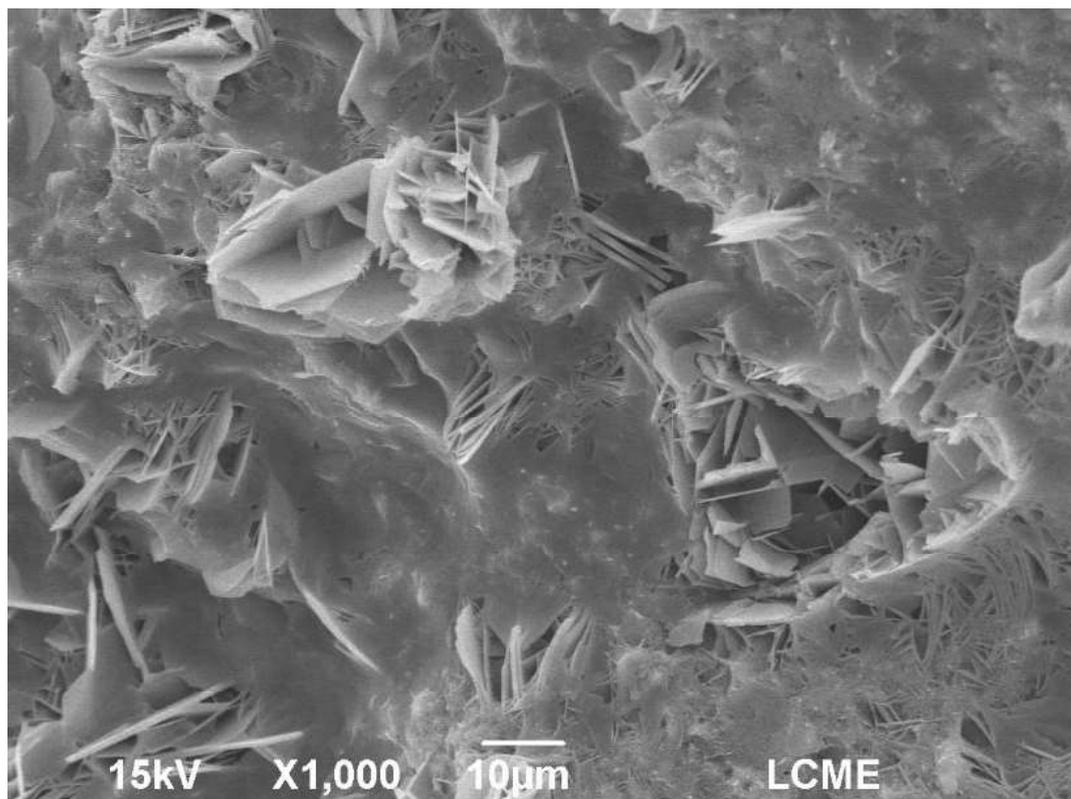
Figura 4.24 -Amostras de (a) solo, (b) solo + 7% de cal dolomítica e (c) solo + 7% de cal de casca de ovo, ampliadas 1.000x.



(a)



(b)

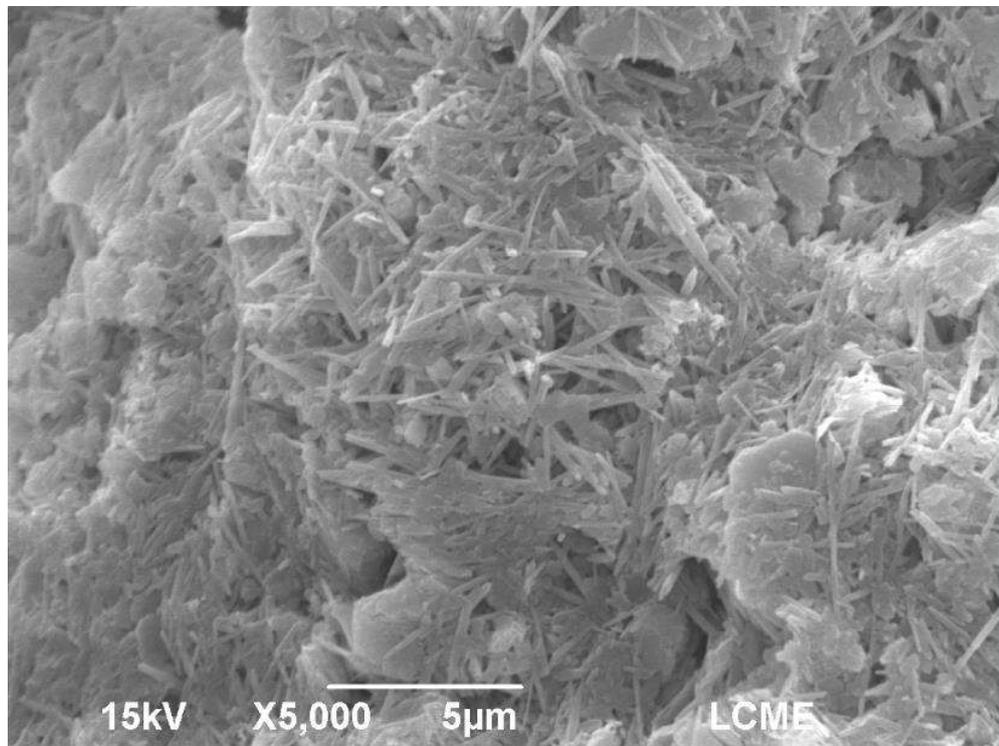


(c)

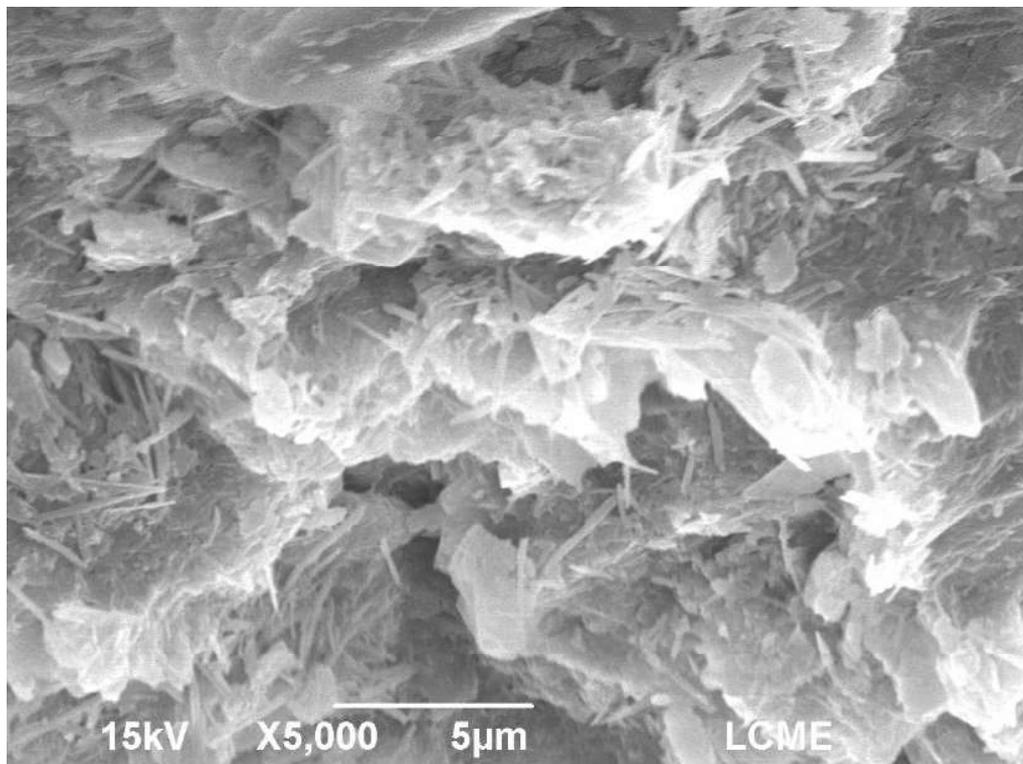
Fonte: LCME - UFSC

A figura 4.25 mostra as amostras de (a) solo, (b) mistura de solo com 7% de cal dolomítica e (c) mistura de solo com 7% de cal de casca de ovo ampliadas 5.000x.

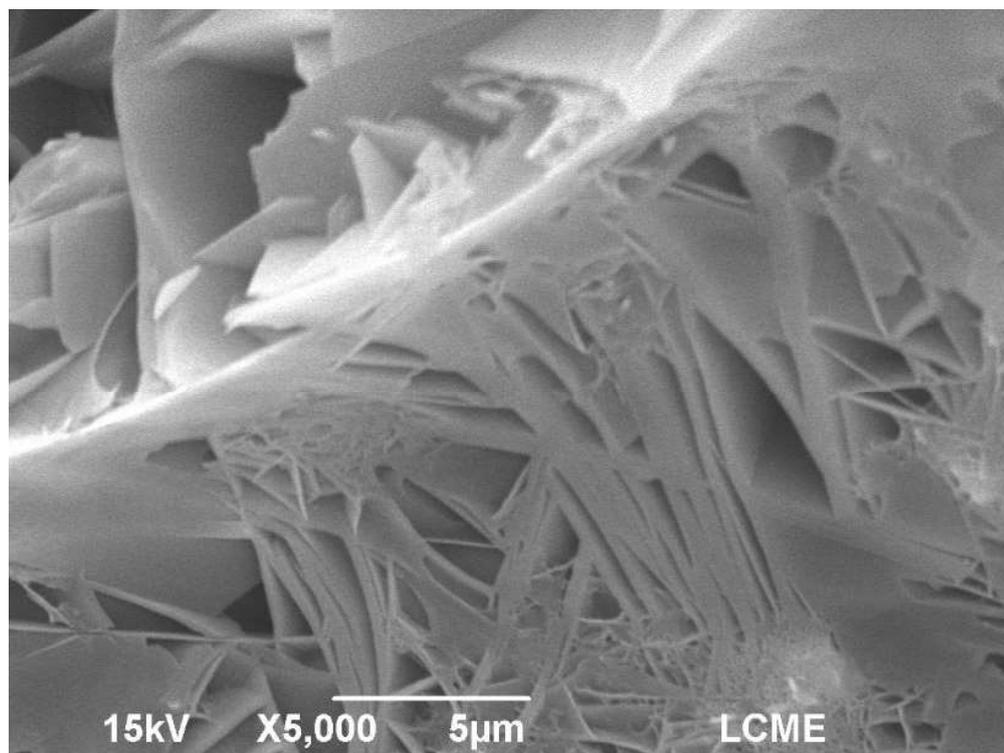
Figura 4.25 -amostras de (a) solo, (b) solo com 7% de cal dolomítica e (c) solo com 7% de cal de casca de ovo ampliadas 5.000x.



(a)



(b)



(c)

Fonte: LCME - UFSC

É possível observar na Figura 4.24.a e ainda mais claramente na Figura 4.25.a a estrutura em formato de agulhas do solo sem aditivos, demonstrando a estrutura típica de um solo fino. Já no solo tratado com cal dolomítica (Figuras 4.24.b e 4.25.b) observa-se a dissolução de parte dos argilominerais para formação de géis hidratados de silicato de cálcio (CSH), aluminato de cálcio (CAH) e silicato de aluminato de cálcio (CASH), conforme descrito no item 2.4, evidenciando o acontecimento das reações pozolânicas entre as partículas de argila e da cal. Imagens similares foram obtidas por Al-Mukhtar *et al.* (2012).

Para as amostras de solo com 7% cal de casca de ovo (Figuras 4.24.c e 4.25.c), que obtiveram RCS 3vezes maiores que as amostras com 7% de cal dolomítica, quase não se identifica a estrutura original do solo, tendo sido substituída praticamente na sua totalidade por géis e uma malha cristalina formada por silicato de cálcio (CSH), aluminato de cálcio (CAH) e silicato de aluminato de cálcio (CASH).

### 4.3.2 Misturas de solo+cal+25% de cinza para ambas as cales

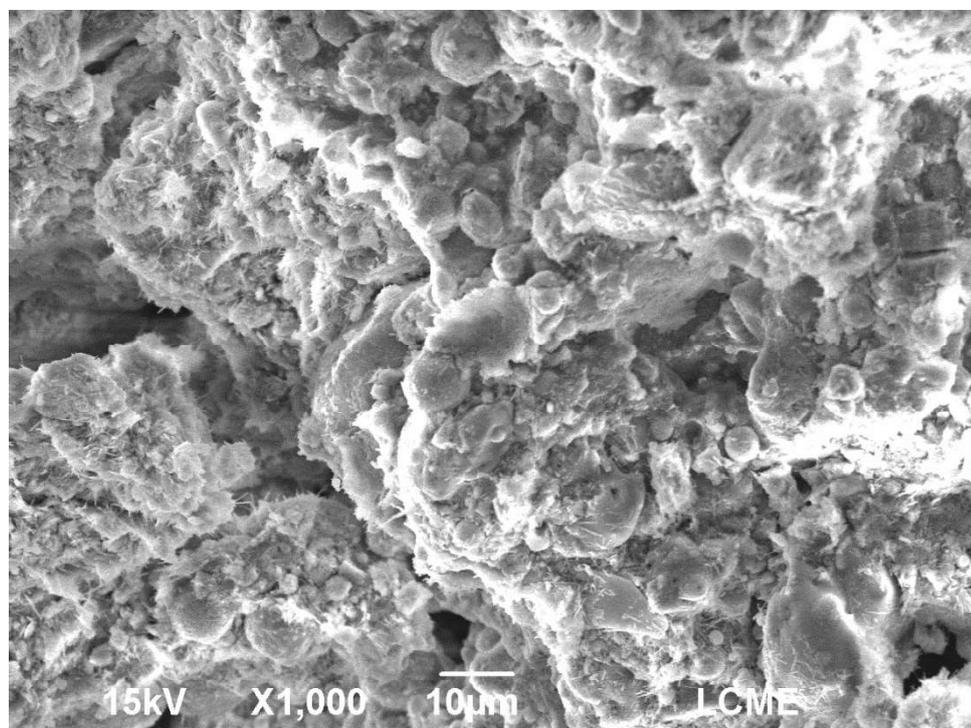
A figura 4.26 mostra as amostras de solo com 7% de cal e 25% de cinza volante com (a) cal dolomítica e com (b) cal de casca de ovo ampliadas 1.000x e 5.000x, respectivamente.

Nas imagens, nota-se a estrutura esférica das partículas de cinza volante, conforme relatado por e Ahmaruzzaman e Gupta (2012) e Siddique e Khan (2011).

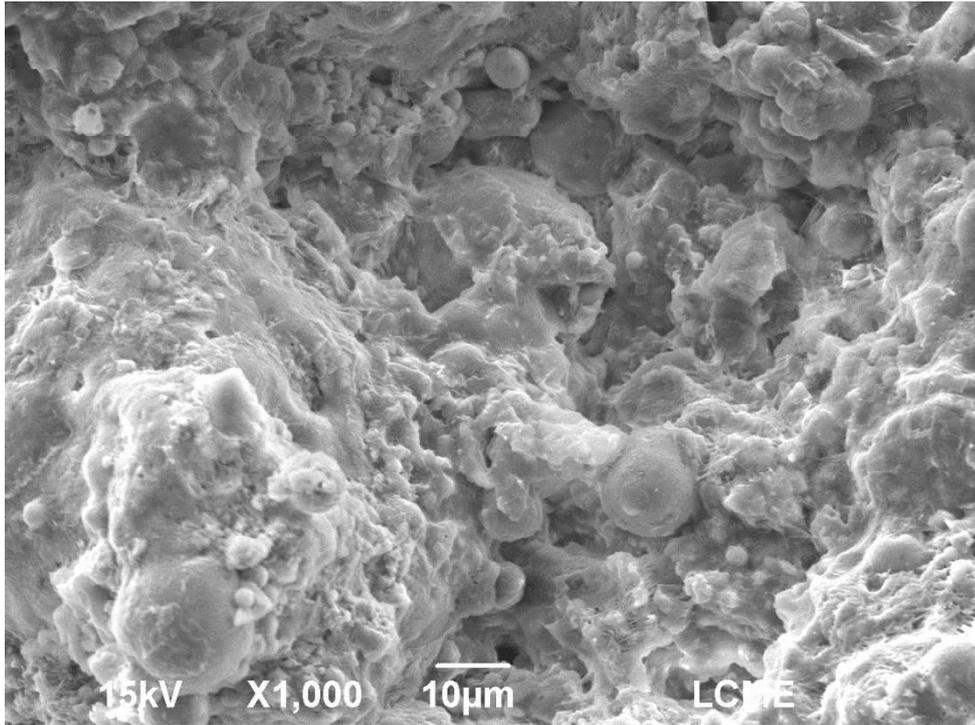
Através das imagens de microscopia percebemos que a cinza volante não reage tão bem com a cal quanto a argila presente no solo, isso é mais evidente para o solo melhorado com cal de casca de ovo, e explica a diminuição da RCS das misturas com cal e casca de ovo com o aumento dos teores de cinza volante.

Embora para as misturas com cal dolomítica se observa um aumento da RCS com a adição de cinza volante, é provável que a maior parte desse aumento seja devido à melhor distribuição granulométrica da mistura causada pela cinza.

Figura 4.26 - as amostras de solo+25% de cinza volante com (a) 7% de cal dolomítica e com (b) 7% de cal de casca de ovo ampliadas 1.000x.



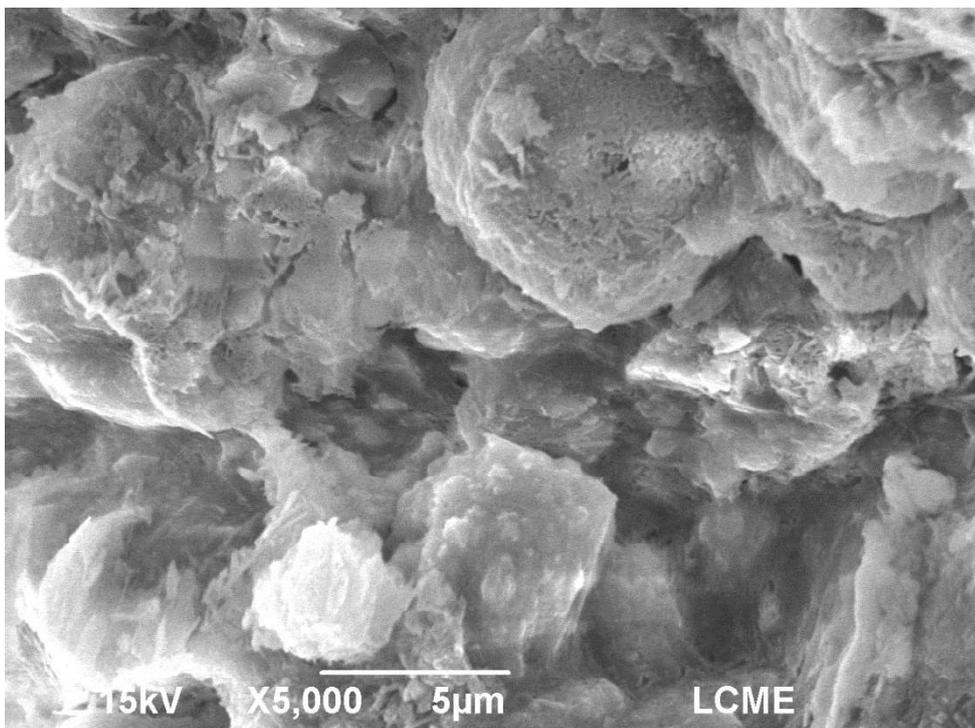
(a)



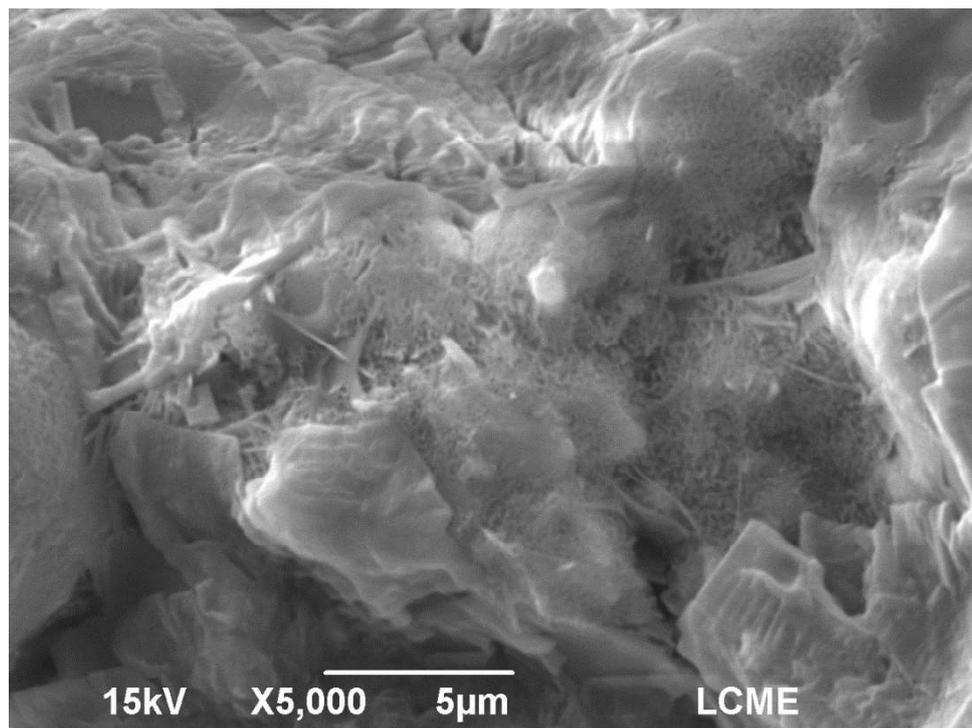
(b)

Fonte: LCME - UFSC

Figura 4.27 - as amostras de solo+25% de cinza volante com (a) 7% de cal dolomítica e com (b) 7% de cal de casca de ovo ampliadas 5.000x.



(a)



(b)

Fonte: LCME – UFSC

#### 4.4 COMPARATIVO COM A LITERATURA E AVALIAÇÃO DE APLICABILIDADE PRÁTICA DAS MISTURAS

Os resultados encontrados sobre o aumento de resistência causado pelo aumento dos teores de cal condizem com outros estudos sobre o tema para a cal dolomítica (Dalla Rosa, 2009; Consoli *et al.*, 2014a, Consoli *et al.*, 2016). Não foram encontrados muitos estudos usando a cal da casca de ovo hidratada para melhoramento de solos argilosos. Poucos estudos ainda tratam do tema da RCS de solos melhorados com cal de casca de ovo. Favretto (2020) realizou testes de RCS e RCT em solos argilosos com cal de casca de ovo virgem nos teores de 5%, 7% e 10% para 28 dias, encontrando valores de RCS entre 75 a 400 kPa, valores muito inferiores do que os encontrados na presente pesquisa. Não foi encontrado na literatura estudos comparativos da RCS entre as cales estudadas.

Os resultados encontrados sobre o aumento de resistência causado pelo acréscimo de cinza volante e cal dolomítica nos teores estudados condizem com outros estudos sobre o tema (Dalla Rosa, 2009; Consoli *et al.*, 2014a, Consoli *et al.*, 2016; Deepak *et al.*, 2015). Porém, não foram encontrados na literatura estudos usando a mistura de cal de casca de ovo e cinza volante para melhoramento de solos argilosos.

Consoli *et al.* (2015), mostra que as equações 7 e 8 (Jaeger *et al.* 2007) podem ser usadas para estimar  $\phi$  e  $c$  para solos melhorados com cal e cinza volante.

$$\phi = \arcsin \arcsin \left( \frac{\sigma_c - 4\sigma_t}{\sigma_c - 2\sigma_t} \right) \quad (7)$$

$$c = \frac{\sigma_c \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_c - 4\sigma_t}{\sigma_c - 2\sigma_t} \right) \right]}{2 \cos \left[ \arcsin \arcsin \left( \frac{\sigma_c - 4\sigma_t}{\sigma_c - 2\sigma_t} \right) \right]} \quad (8)$$

Assumindo que RTC é 0,12 da RCS, como apresentado no item 2.5.4, seria possível, dessa forma, estimar tanto  $\phi$  como  $c$  das misturas estudadas. Os valores encontrados para cada mistura são apresentados nas tabelas A.1 a A.6 no apêndice.

Através dos valores de  $c$  e  $\phi$  para as diferentes misturas, apresentados nas tabelas A.1 a A.6, no Apêndice, seria possível melhorar as propriedades geotécnicas do talude, auxiliando na contenção da encosta que já sofreu deslizamento.

#### DISCUSSÃO MAIS APROFUNDADA

De modo geral, os três aditivos utilizados nessa pesquisa (cal dolomítica, cal de casca de ovo e cinza volante) apresentaram bom potencial para seu uso no melhoramento do solo argiloso estudado.

Considerando a resistência mínima exigida para um subleito melhorado com cal após 28 dias de cura de 0,34 MPa (Christopher *et al.*, 2006), todas as misturas cal de casca de ovo para os três teores de cinza volante e para os três pesos específicos estudados apresentaram valores superiores à RCS mínima.

De acordo com DNIT 143/2010, misturas de solo-cimento para uso como base de pavimentação devem apresentar o valor mínimo de 21 kg/cm<sup>2</sup>, ou 2,1 MPa para a resistência à compressão aos 7 (sete) dias. Considerando o valor da RCS para 7 dias de cura como 0,60 da RCS para 28 dias (proporção mais conservadora), conforme discutido no item 3.6.2, apenas a mistura com 7% de teor de cal de casca de ovo e peso específico de 1,7 g/cm<sup>3</sup> poderia ser usada para tal fim (destaca-se que outros parâmetros além da RCS precisam ser analisados).

Levando em conta tanto o transporte da cinza volante até o local da obra, como a produção da cal de casca de ovo, que ainda não existe em escala industrial, uma análise da viabilidade econômica do uso desses materiais precisaria ser realizada.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo serão sintetizadas as principais conclusões obtidas, assim como serão sugeridos pontos para dar continuidade à presente pesquisa.

### 5.1 CONCLUSÕES

Através da análise dos resultados dos ensaios de RCS é possível perceber que, para os teores de cal analisados, ambas as cales proporcionaram um aumento da RCS linear em função do aumento do teor de cal, porém, a cal de casca de ovo proporciona um aumento muito maior na RCS do solo estudado em relação à cal dolomítica, isso se deve, principalmente, ao seu elevado teor de pureza, mostrado nos ensaios de difração de raio-X. A análise das imagens da microscopia das diferentes misturas ajudou a elucidar as interações dos materiais utilizados na pesquisa.

Embora seja necessárias menores quantidades de cal de casca de ovo e a mesma proporcione maiores RCS ao solo em relação à cal dolomítica, a cal da casca de ovo ainda não é produzida em escala industrial no Brasil, tornando sua aplicação como agente melhorador de solo em obras de engenharia limitada.

A relação  $\eta/(L_v)^{0,12}$  proposta por Consoli *et al.* (2016c) se mostrou muito satisfatória para prever o comportamento das misturas de solo e cal estudadas, porém não se mostrou tão precisa para as misturas contendo cinza volante, sendo que, quanto maior o teor de cinza, menor a precisão da relação, não havendo um mesmo expoente que se aplicasse satisfatoriamente para todos os teores de cinza e tipos de cal. Isso se deve, possivelmente, à heterogeneidade da cinza volante, o que torna mais difícil prever seu comportamento. O valor do expoente aplicado à  $L_v$  também foi maior que 0,12 (entre 0,2 e 0,4), mostrando que, para os solos tratados com cinza volante e cal, a influência da porosidade é menor em relação ao teor volumétrico de cal do que aos solos tratados apenas com cal.

As misturas de cal com casca de ovos atingiram valores de RCS maiores que outras pesquisas (Saldanha *et al.*, 2021; Favretto, 2020) e as misturas estudadas mostraram potencial para uso como materiais de pavimentação.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De forma a dar prosseguimento à pesquisa realizada nesta dissertação e ampliar o conhecimento sobre o comportamento de materiais artificialmente cimentados, o são sugeridos os seguintes tópicos de pesquisa:

- Verificar a resistência à compressão simples em maiores tempos de cura para as misturas estudadas. Podendo então, determinar o tempo necessário para que as reações pozolânicas da mistura cessem;

- Verificar a resistência à tração na compressão diametral para determinar uma relação entre a RCS e a RTD das misturas;

- Realizar ensaios de medida de rigidez inicial através da técnica de ondas ultrassônicas, visando a determinação do módulo cisalhante elástico ( $G_0$ ).

- Estudar a viabilidade econômica da produção da cal de casca de ovo em grande escala.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7175: Cal hidratada para argamassa - Especificação. 1986.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12253: Solo-cimento – dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, ABNT,1992. 3p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 5 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a. 8 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 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: ABNT, 2016b. 10 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c. 5 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016d. 3 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo -Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016e. 12 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 9 p.

AKAWWI, E. & AL-KHARABSHEH, A. 2002. Lime stabilization effects on geotechnical properties of expansive soils in Amman, Jordan. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. [www.ejge.com/2000/ppr0020](http://www.ejge.com/2000/ppr0020).

AL-MUKHTAR, MUZAHIM ; KHATTAB, SUHAIL ; ALCOVER, JEAN-FRANCOIS. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. *Engineering geology*, 2012, Vol.139-140, p.17-27

AL-MUKHTAR, MUZAHIM ; LASLEDJ, ABDELMADJID ; ALCOVER, J.F. Lime consumption of different clayey soils. *Applied clay science*, 2014, Vol.95, p.133-145

AMIRALIAN, S., CHEGENIZADEH, A. & NIKRAZ, H. 2012a. Investigation on the Effect of Lime and Fly Ash on Hydraulic Conductivity of Soil. *International Journal of Biological, Ecological and Environmental Sciences (IJBEES)*, Vol. 1, 120-123.

AMIRALIAN, S., CHEGENIZADEH, A. & NIKRAZ, H. 2012b. Laboratory Investigation on the Compaction Properties of Lime and Fly Ash Composite. *International Conference on Civil and Architectural applications (ICCAA'2012)*. Phuket (Thailand): Planetary Scientific Research Center.

AMIRALIAN, S., CHEGENIZADEH, A. & NIKRAZ, H. 2012c. Laboratory Investigation on the Effect of Fly Ash on the Compressibility of Soil. *International Conference on Civil and Architectural applications (ICCAA'2012)*. Phuket (Thailand): Planetary Scientific Research Center.

AMIRALIAN, S., CHEGENIZADEH, A. & NIKRAZ, H. 2012d. Laboratory Investigation on the Effect of Lime on Compressibility of Soil. *International Conference on Civil and Architectural applications (ICCAA'2012)*. Phuket (Thailand): Planetary Scientific Research Center.

ANOOP, S P; BEEGOM, HIZANA; JOHNSON, JWOLEENA; MIDHULA, J; MUHAMMED, THARIS. Potential of Egg shell powder as replacement of Lime in soil stabilization. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL – ABPA. Relatório Anual 2021. 2021. Disponível em: <http://abpa-br.org/abpa-lanca-relatorioanual-2021/>. Acesso em: 08 jun. 2021.

ASTM C 618-89. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. *Annual book of ASTM standards*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia. [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM C618. (2020). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. American Society for Testing and Materials.

ACAA. (2021). Fly Ash Basics. American Coal Ash Association.

ABMARUZZAMAN, M. (2018). Utilization of fly ash for stabilization of expansive soils. *Construction and Building Materials*, 187, 1032-1047.

AL-MUKHTAR, M., LASLEDJ, A., & HAMAD, E. (2012). Stabilization of highly expansive clay with lime and date palm fibers. *Engineering Geology*, 123(1–2), 112–118.

AL-MUKHTAR, M., LAUE, J., & KADHIM, A. (2014). Stabilization of an expansive soil with a high calcium fly ash. *Construction and Building Materials*, 68, 82–88.

ANON. (1990). Lime stabilization. Roads and Pavements Laboratory Research Report, 48.

ARAÚJO, C. M., RODRIGUES, M. R., & LIMA, L. A. F. (2021). Chemical, physical and mechanical properties of commercial lime and eggshell lime for use in mortar. *Construction and Building Materials*, 279, 122487.

BROWN, C., & JONES, D. (2022). Lime Stabilization: Recent Innovations and Applications. *Proceedings of the International Conference on Geotechnical Engineering*. (12), 1557–1565.

BARNES, P., & SEAR, D. (2006). *Engineering Applications of Geochemical Principles*. Oxford University Press.

BEHARA, B. & MISHRA, M. Microstructure and Leaching Characteristics of Fly Ash-Mine Overburden-Lime Mixtures. *Proceeding of International Conference on Chemical, Civil and Environment Engineering*, 2012. 256-260.

BARKER, J., ROGERS, C. & BOARDMAN, D. 2006. Physio-chemical changes in clay caused by ion migration from lime piles. *Journal of materials in civil engineering*, 18, 182-189.

BELL, F. G. (1988). “Stabilization and treatment of clay soils with lime, Part 1—Basic principles.” *Ground Eng.*, 21(1), 10–15.

BELL, F. G. (1996). “Lime stabilization of clay minerals and soils.” *Eng. Geol.*, 42(4), 223–237.

BECK K, BRUNETAUD X, MERTZ J.-D, AL-MUKHTAR M (2010) On the use of eggshell lime and tuffeau powder to formulate an appropriate mortar for restoration purposes. In: Smith, BJ,

BENSAIFIA, E; BOUTELDJAA. F; NOUAOURIAA; M.S., BREULB; P. Influence of crushed granulated blast furnace slag and calcined eggshell waste on mechanical properties of a compacted marl. *Transportation Geotechnics* 20 (2019) 100244

BOSE, B. 2012. Geo-Engineering Properties of Expansive Soil Stabilized with Fly Ash. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17.

BORON, Luana. Citrato de cálcio obtido da casca de ovo: biodisponibilidade e uso como suplemento alimentar. 2004. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos.

BORDIGNON, Vitor Reinaldo. Efeitos da adição da cal hidratada na estabilização de um solo sedimentar para pavimentação urbana na região de Curitiba. 2015. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CASTRO-FRESNO, D., MOVILLA-QUESADA, D., VEGA-ZAMANILLO, Á. & CALZADA-PÉREZ, M. A. 2011. Lime Stabilization of bentonite sludge from tunnel boring. *Applied Clay Science*, 51, 250-257.

CETIN, H. 2004. Soil-particle and pore orientations during consolidation of cohesive soils. *Engineering geology*, 73, 1-11.

COKCA E (2001) Use of class C fly ash for the stabilization of an expansive soil. *J Geotech Geoenviron Eng ASCE* 127(7):568–573

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. Key parameters for strength control of artificially cemented soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Reston, American Society of Civil Engineers, v. 133, n. 2, p. 197-205, 2007b.

CONSOLI, N. C.; LOPES Jr., L. da S.; HEINECK, K. S. Key parameters for the strength control of lime stabilized soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 21(5), p. 210 – 216, 2009a.

CONSOLI, N. C.; LOPES Jr., L da S.; FOPPA, D.; HEINECK, K. S. Key parameters dictating strength of lime/cement-treated soils. *Geotechnical Engineering*, v. 162 (GE2), p. 111 – 118, 2009b.

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; FLOSS, M. F.; FESTUGATO, L. Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Reston, American Society of Civil Engineers, v. 136, n. 5, p. 759-763, may 2010.

CONSOLI, N. C.; de MORAES, R. R.; FESTUGATO, L. Parameters controlling tensile and compressive strength of fiber-reinforced cemented soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, New York: ASCE . 2012b.

CONSOLI, N. C. A method proposed for the assessment of failure envelopes of cemented sandy soils. *Engineering Geology*, pp. 61-68, 2014.

CONSOLI, N.C.; LOPES JUNIOR, L. S.; Consoli B.S.; FESTUGATO, L.. Mohr-Coulomb failure envelopes of lime-treated soils. *Geotechnique*, v. 64, p. 165-170, 2014.

CONSOLI, N. C; LOTERO CAICEDO, A. M; BECK SALDANHA, R. ; SCHEUERMANN FILHO, H.C ; MONCALEANO ACOSTA, C. J. Eggshell Produced Limes: Innovative Materials for Soil Stabilization *Journal of Materials in Civil Engineering* , 2020.

CONSOLI, NILO CESAR, ANDRÉS MAURÍCIO LOTERO CAICEDO, RODRIGO BECK SALDANHA, HUGO CARLOS SCHEUERMANN FILHO, AND CINDY JOHANNA MONCALEANO ACOSTA. "Eggshell Produced Limes: Innovative Materials for Soil Stabilization." *Journal of Materials in Civil Engineering* 32.11 (2020): *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, Vol.32 (11). Web.

CONSOLI, NILO CESAR; DA ROCHA, CECÍLIA GRAVINA; SILVANI, CARINA. Devising dosages for soil–fly ash–lime blends based on tensile strength controlling equations. *Construction and Building Materials* 55 (2014) 238–245

CONSOLI, NILO CESAR; FESTUGATO, LUCAS; CONSOLI, BERNARDO SCAPINI; LOPES JR, LUIZMAR DA SILVA. Assessing Failure Envelopes of Soil–Fly Ash–Lime Blends. *J. Mater. Civ. Eng.*, 2015, 27(5): 04014174.

CONSOLI, NILO CESAR; DALLA ROSA, AMANDA; SALDANHA, RODRIGO BECK. Variables Governing Strength of Compacted Soil–Fly Ash–Lime Mixtures. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 2011, 23(4): 432-440

CONSOLI, NILO CESAR; PRIETTO, PEDRO DOMINGOS MARQUES; LOPES JR., LUIZMAR DA SILVA; WINTER, DANIEL. Control factors for the long term compressive strength of lime treated sandy clay soil. *Transportation Geotechnics 1* (2014) 129–136

CONSOLI, N. C., PRIETTO, P. D., & FALCHI, D. R. (2014a). Laboratory and field studies on lime-treated soils from São Paulo State. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(3), 611–621.

CONSOLI, N. C., ET AL. (2022). Predictive Models for Mechanical Behavior of Lime-Stabilized Soils: A Comprehensive Review. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, 79(1), 45-58.

CHITTOORI, B., & KODIKARA, J. (2012). Engineering properties and behavior of expansive soil stabilized with lime and recycled asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(11), 1423–1433.

CHRISTOPHER, B. R., YUNUSA, I. A. M., & PHILLIPS, I. R. (2006). Stabilization of a clayey soil with cement kiln dust and fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(4), 596–603.

CUISINIER, O., AURIOL, J.-C., LE BORGNE, T. & DENELEE, D. 2011. Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil. *Engineering geology*, 123, 187-193.

CUISINIER, O., MASROURI, F., PELLETIER, M., VILLIERAS, F. & MOSSER-RUCK, R. 2008. Microstructure of a compacted soil submitted to an alkaline PLUME. *Applied Clay Science*, 40, 159-170.

DALLA ROSA, A. Estudo dos Parâmetros-Chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

DAHALE, P. P., NAGARNAIK, P. & GAJBHIYE, A. 2012. Utilization of Solid Waste for Soil Stabilization: A Review. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17.

DASH, S. K. & HUSSAIN, M. 2012. Lime Stabilization of Soils: Reappraisal. *Journal of materials in civil engineering*, 24, 707-714.

DEGIRMENCI, N., OKUCU, A. & TURABI, A. 2007. Application of phosphogypsum in soil stabilization. *Building and environment*, 42, 3393.

DEEPAK, M.S.; ROHINI, S.; B, HARINI, B.S.; ANANTHI, G. BEULAH GNANA. Influence of fly-ash on the engineering characteristics of stabilised clay soil. *Materials Today: Proceedings* 37 (2021) 2014–2018

FERGUSON G (1993). Use of self-cementing fly ashes as a soil- stabilizing agent. In: *Proceedings of session on fly ash for soil improvement*, ASCE Geotechnical Special Publication 36, pp 1–14

FERRAZ E, GAMELAS JAF, COROADO J, MONTEIRO C, ROCHA F (2018) Recycling waste seashells to produce calcitic lime: characterization and wet slaking reactivity. *Waste Biomass Valoriz.* <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0232-y>

FAVRETTO, A. C. C., ARAÚJO, C. M., & LIMA, L. A. F. (2018). Evaluation of the compressive strength of mortars produced with lime obtained from eggshell. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 18415–18422.

FERRAZ, E., OLIVEIRA, D. V., & AYDIN, B. (2018). The study of calcium oxide (CaO) obtained from waste eggshells as an alternative to commercial lime. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 6482–6489.

FOPPA, A. B. (2018). Impact of Void Ratio/Lime Volume Ratio on the Mechanical Behavior of Stabilized Soils. *Geotechnical Engineering Journal*, 45(2), 217-230.

FIROOZI, A. A., HAJIALILUE-BONAB, M., & AZAMATHULLA, H. M. (2017). Lime stabilization of a highly expansive clayey soil using waste plastic bottles. *Environmental Earth Sciences*, 76(9), 330.

GOMES, R., & SILVA, M. (2019). Utilização de Cinzas Volantes na Estabilização de Solos: Revisão Bibliográfica. *Revista de Engenharia Civil*, 21(3), 45-58.

GHOBADI, M. J., MOAYED, R. Z., & KARIMPOUR-FARD, M. (2014). Stabilization of a highly expansive soil using lime and barley straw ash. *Construction and Building Materials*, 70, 142–148.

GUIMARÃES, L. F. C. (2002). Utilização da casca de ovo na produção de cal para uso em argamassas. *Revista Matéria*, 7(1), 85–93.

GHOSH, A. 2009. Bearing ratio of reinforced fly ash overlying soft soil and deformation modulus of fly ash. *Geotextiles and geomembranes*, 27, 313.

GHOSH, A. 2010. Compaction Characteristics and Bearing Ratio of Pond Ash Stabilized with Lime and Phosphogypsum. *Journal of materials in civil engineering*, 22, 343-351.

GREGORY PAUL MAKUSA. Soil stabilization methods and materials. Luleå, sweden.

GHOSH, A. 2009. Bearing ratio of reinforced fly ash overlying soft soil and deformation modulus of fly ash. *Geotextiles and geomembranes*, 27, 313.

GHOSH, A. 2010. Compaction Characteristics and Bearing Ratio of Pond Ash Stabilized with Lime and Phosphogypsum. *Journal of materials in civil engineering*, 22, 343-351.

GLADE, GLADE, T., ANDERSON, M. & CROZIER, M. J. Landslide Hazard and Risk. 2005.

GHOBADI, M. H. ; ABDILOR, Y. ; BABAZADEH, R. Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 2014, Vol.73 (2), p.611-619

GUIMARÃES, J. E. P. A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil. 2ª ed. São Paulo: PINI, 2002.

GRAY DH, LIN YK (1972) Engineering properties of compacted fly ash. *J Soil Mech Found Div* 98(4):361–380

HAN, JIE. Principles and practice of ground improvement. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2015.

HAN, J. (2015). *Soil mechanics: concepts and applications* (3rd ed.). CRC Press.

HERRIN, M., & MITCHELL, J. K. (1961). Lime stabilization of soil. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 87(2), 15–37.

HARICHANE, H., GHRICI, M. & KENAI, S. 2012. Effect of the combination of lime and natural pozzolana on the compaction and strength of soft clayey soils: a preliminary study. *Environmental earth sciences*, 66, 2197-2205.

HARICHANE, K., GHRICI, M. & KENAI, S. Effect of combination of lime and natural pozzolana on the plasticity of soft clayey soils. 2nd International conference on new developments in soil mechanics and geotechnical engineering, Nicosia, North Cyprus, 2009. 574- 581.

HARICHANE, K., GHRICI, M., KENAI, S. & GRINE, K. 2011a. Use of Natural Pozzolana and Lime for Stabilization of Cohesive Soils. *Geotechnical and geological engineering*, 29, 759.

HARICHANE, K., GHRICI, M. & MISSOUM, H. 2011b. Influence of natural pozzolana and lime additives on the temporal variation of soil compaction and shear strength. *Frontiers of Earth Science*, 5, 162-169.

HAUSMAN, MR. *Engineering principles of ground modification*. McGraw-Hill, New York, 1990

HILT, G. H.; DAVIDSON, D. T. Lime Fixation in Clayey Soils. Highway Research Board, Washington, D.C., n.262, p.20-32. 1960.

HILT, G. H., AND DAVIDSON, D. T. (1960). "Lime fixation on clayey soils." Bulletin No. 262, Highway Research Board, Washington, DC, 20–32. Jackson, M. L. (1958). *Soil chemical analysis*, Prentice-Hall International, London.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. *Soil Stabilization – Principles and Practice*. Sidney: Butterworths, 1972. 374p.

INDRARATNA B, NUTALAYA P, KUGANENTHIRA N (1991) Stabilization of a dispersive soil by blending with fly ash. *Q J Eng Geol Hydrogeol* 24(3):275–290

JIRIMALI HD, CHAUDHARI BC, KHANDERAY JC, JOSHI SA, SINGH V, PATIL AM, GITE VV (2018) Waste eggshell-derived calcium oxide and nanohydroxyapatite biomaterials for the preparation of LLDPE polymer nanocomposite and their thermomechanical study. *Polym-Plast Technol Eng* 57:804–811

KAVAK, A. & AKYARL, A. 2007. A field application for lime stabilization. *Environmental geology*, 51, 987.

KAVAK, A. & BAYKAL, G. K. 2012. Long-term behavior of lime-stabilized kaolinite clay. *Environmental earth sciences*, 66, 1943-1955.

KIM, B. & PREZZI, M. 2008. Evaluation of the mechanical properties of class-F fly ash. *Waste Management*, 28, 649.

KUMAR, M. ARUN; KULANTHAIVEL, P.; SELVAPRAVEEN, S.; VINODHKUMAR, S.; NAVEENRAJ, V. Strength Behaviour of Clay Soil Stabilized With Lime. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 961 (2020) 012003

KIM, S.-J., & PREZZI, M. (2008). Strength and compressibility characteristics of lime-stabilized kaolinitic soils. *Engineering Geology*, 100(3–4), 116–126.

KUMAR, V., RAJ, R., & KUMAR, A. (2020). Study of expansive soil stabilization using waste marble dust and eggshell powder. In *Recent Developments in Sustainable Infrastructure* (pp. 297–303). Springer.

LOPES JUNIOR, R. (2020). Lime Stabilization: Recent Advances and Applications. *Proceedings of the International Conference on Geotechnical Engineering*.

MOSADDEGH E, HASSANKHANI A (2014) Preparation and characterization of nano-CaO based on eggshell waste: novel and green catalytic approach to highly efficient synthesis of pyrano[4,3-b]pyrans. *Chin J Catal* 35:351–356

MARQUES, S. (2023). Advances in Lime Stabilization Techniques: A State-of-the-Art Review. *Journal of Civil Engineering Research*, 21(3), 321-335.

MIR BA (2001) The effect of fly ash on the engineering properties of black cotton soils. M. E. thesis, Department of Civil Engineering, IISc, Bangalore

MIR BA, PANDIAN NS (2003) Fly ash—as an engineered construction material. In: *Proceedings of international conference on construction technology (CONTEC)*, 13–15 Oct 2003, University Malaysia Sabah, Malaysia, pp 57–68

MANASSEH, J. & OLUFEMI, A. I. 2008. Effect of lime on some geotechnical properties of Igumale shale. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 13, 1-12.

MCCARTHY, M. J., CSETENYI, L. J., SACHDEVA, A. & DHIR, R. K. 2012. Identifying the role of fly ash properties for minimizing sulfate-heave in lime-stabilized soils. *Fuel*, 92, 27-36.

MOULTON KL (1978) Technology and utilization of power plant ash in structural fills and embankments. West Virginia University, pp 791–806

NAGABHUSHANA KR, LOKESHA HS, REDDY SS, PRAKASH D, VEERABHADRASWAMY M, BHAGYALAKSHMI H, JAYARAMAIAH JR (2017) Thermoluminescence properties of CaO powder obtained from chicken eggshells. *Radiat Phys Chem* 138:54–59

NATT, GS; JOSHI, RC. Properties of cement and lime–fly ash stabilized aggregate. *Transport Research Record* 998. Transport Research Board, National Research Council, 1984. pp 32–40

NATIONAL RESEARCH COUNCIL . TRANSPORTATION RESEARCH, B. 1991. Soil stabilization, 1991, Washington, D.C., Transportation Research Board, National Research Council.

NALBANTOGLU, Z. & TUNCER, E. R. 2001. Compressibility and hydraulic conductivity of a chemically treated expansive clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 154.

NÚÑEZ, W. P. Estabilização Físico-química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando seu Emprego na Pavimentação. 1991. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

NRRDA. (2007). Manual for construction of road over weak and expansive subgrade. National Rural Roads Development Agency.

OKEKE, C.; ABBEY, S.; OTI, J.; EYO, E.; JOHNSON, A.; NGAMBI, S.; ABAM, T.; UJILE, M. Appropriate Use of Lime in the Study of the Physicochemical Behaviour of Stabilised Lateritic Soil under Continuous Water Ingress. *Sustainability* 2021, 13, 257. <https://doi.org/10.3390/su13010257>

PHANIKUMAR, B. R., & SHARMA, R. S. (2004). Effect of fly ash on engineering properties of expansive soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(7), 764–767.

PRAKASH K, SRIDHARAN A (2009) Beneficial properties of cal ashes and effective solid waste management. *Pract Period Hazard Toxic Radioact Waste Manag ASCE* 13(4):239–248

PHANIKUMAR BR, SHARMA RS (2004) Effect of fly ash on engineering properties of expansive soil. *J Geotech Geoenviron Eng* 130(7):764–767

PHANIKUMAR BR, SHARMA RS (2007) Volume change behaviour of fly ash-stabilized clays. *J Mater Civ Eng* 19(1):67–74

OLIVEIRA DA, Benelli P, Amante ER (2013) A literature review on adding value to solid residues: egg shells. *J Clean Prod* 46:42–47

PARSONS, R. L. & KNEEBONE, E. 2005. Field performance of fly ash stabilised subgrades. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Ground improvement*, 9, 33-38.

RAMADAS, T., KUMAR, N. D. & YESURATNAM, G. 2011. Geotechnical characteristics of three expansive soils treated with lime and flyash. *International Journal of Earth Sciences and Engg*, 4, 46-49.

RIVERA EM, ARAIZA M, BROSTOW W, CASTAN˜O VM, D'ıaz- Estrada JR, Herna'ndez R, Rodr'ıguez JR (1999) Synthesis of hydroxyapatite from eggshells. *Mater Lett* 41:128–134

ROGERS, C. D. F., GLENDINNING, S., AND ROFF, T. E. J. Lime modification of clay soils for construction expediency. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, v. 125, p. 242-249, 1997.

SMITH, A. ET AL. (2020). Advances in Lime Stabilization Techniques. *Journal of Geotechnical Engineering*, 45(3), 321-335.

SCHNAID, F., PRIETTO, P. D. M., & CONSOLI, N. C. (2001). Characterization of Cemented Sand in Triaxial Compression. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(10), 857–868. doi:10.1061/(asce)1090-0241(2001)127:10(857)

SMITH, J., & JOHNSON, R. (2021). Fly Ash Utilization in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering: A Comprehensive Review. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 78(4), 289-305.

SACIA ER, RAMKUMAR S, PHALAK N, FAN L-S (2013) SYNTHESIS AND REGENERATION OF sustainable cao sorbents from chicken eggshells for enhanced carbon dioxide capture. *ACS Sustain Chem Eng* 1:903–909

SECO, A., RAMÍREZ, F., MIQUELEIZ, L., GARCÍA, B. & PRIETO, E. 2011. The use of non-conventional additives in Marls stabilization. *Applied Clay Science*, 51, 419-423.

SRIDHARAN A, PANDIAN NS, SRINAVAS S (2001) Compaction behaviour of Indian coal ashes. In: *Proceedings ground improvement*, Thomas Telford, UK, vol 5, pp 13–22

SIVAPULLAIAH PV, PRASHANT JP, SRIDHARAN A (1996) Effect of fly ash on the index properties of BC soil. *Soils Found* 36(1):97–103

SEZER, A. 2006. Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay. *Building and environment*, 41, 150.

SIVAPULLAIAH PV, PRASHANT JP, SRIDHARAN A (1996) Effect of fly ash on the index properties of BC soil. *Soils Found* 36(1):97–103

SHARMA, N. K., SWAIN, S. & SAHOO, U. C. 2012. Stabilization of a Clayey Soil with Fly Ash and Lime: A Micro Level Investigation. *Geotechnical and geological engineering*, 1-9.

SRIDHARAN A, PRASHANTH PJ, SIVAPULLAIAH PV (1997) Effect of fly ash on the unconfined compressive strength of black cotton soil. In: *Proceedings of ground improvement*, Thomas Telford, London, UK, vol 1, pp 169–175

SRIDHARAN A, PANDIAN NS, SRINIVASA PR (1998) Fly ash as construction material in embankments. 4th international symposium on environmental geotechnology and global sustainable development, Aug 9–13, Boston, MA, USA

SRIDHARAN A, PANDIAN NS, SRINAVAS S (2001) Compaction behaviour of Indian coal ashes. In: *Proceedings ground improvement*, Thomas Telford, UK, vol 5, pp 13–22

THOMÉ, A. Estudo do Comportamento de um Solo Mole Tratado com Cal, Visando seu Uso em Fundações Superficiais. 1994. 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

THOMÉ, A.; DONATO, M.; CONSOLI, N. C.; GRAHAM, J. Circular Footings on a Cemented Layer Above Weak Foundation Soil. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 42, n.6, p.1569-1584. 2005.

THOMPSON, M. R. Split-Tensile Strength of Lime-Stabilized Soils. *Highway Research Record*, Washington, D.C. v.92, p.69-82. 1965.

TAN YH, ABDULLAH MO, NOLASCO-HIPOLITO C, ZAUZI NSA (2017) Application of RSM and Taguchi methods for optimizing the transesterification of waste cooking oil catalyzed by solid ostrich and chicken-eggshell derived CaO. *Renew Energy* 114(Part B):437–447

TONINI DE ARAÚJO, MARIANA, SUÉLLEN TONATTO FERRAZZO, GIOVANI JORDI JORDI BRUSCHI, AND NILO CESAR CONSOLI. "Mechanical and Environmental Performance of Eggshell Lime for Expansive Soils Improvement." *Transportation Geotechnics* 31 (2021): 100681. Web.

ZAMAN, T. et al . Evolution and characterization of eggshell as a potential candidate of raw material. *Cerâmica, São Paulo* , v. 64, n. 370, p. 236-241, June 2018.

ZULMIRA, ANA COELHO. TORGAL, F. PACHECO. JALALI, SAID. *A Cal na Construção* . Guimarães, 2009

THOMÉ, A. M. T., TOLENTINO, E. S., & JÚNIOR, L. A. (2005). Avaliação da eficácia da adição de cinzas volantes na melhoria de solos expansivos. *Geotecnia*, 26, 77–88.

TASTAN, E. O., EDIL, T. B., BENSON, C. H., & AYDILEK, A. H. (2011). Stabilization of Organic Soils with Fly Ash. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(9), 819–833. doi:10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000502

VIRIYA-EMPIKUL N, KRASAE P, PUTTASAWAT B, YOOSUK B, CHOLLACOOP N, FAUNGNAWAKIJ K (2010) Waste shells of mollusk and egg as biodiesel production catalysts. *Biore- sour Technol* 101:3765–3767

WILKINSON, D., WATKINS, J., & JONES, P. (2010). The use of hydraulic lime in road construction. *Highways Agency*.

YOSHIMOTO, N., BAWONO, D. R., & EDIL, T. B. (2012). A novel approach to lime stabilization of fine-grained soils using thermally activated byproduct lime. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24

TURAN, CANAN; JAVADI, AKBAR; VINAI, RAFFAELE. Effects of Class C and Class F Fly Ash on Mechanical and Microstructural Behavior of Clay Soil—A Comparative Study. *Materials* 2022, 15, 1845. <https://doi.org/10.3390/ma15051845>

Tabela A.1 – Corpos de prova com solo e cal dolomítica

Corpo-de-prova	L (%)	Lv (%)	$\gamma_u$	w (%)	$\eta$ (%)	$V_{ep}$ (cm <sup>3</sup> )	$V_v$ (cm <sup>3</sup> )	$V_l$ (cm <sup>3</sup> )	$n/(L_v)^{0,1}$ <sub>2</sub>	$q_u$ (kPa)	$q_u$ (média) (kPa)	Desvio padrão ( $\sigma$ )	$\phi$ (°)	c (kPa)
1	3	1,71	1,50	19,6	43,2	196,54	84,86	3,35	40,50	90,8				
2	3	1,67	1,48	19,6	44,2	200,79	88,76	3,36	41,55	86,7				
3	3	1,68	1,48	19,6	44,1	200,79	88,47	3,37	41,41	94,9	90,8	3,4	43,2	19,7
4	3	1,80	1,59	20,2	40,0	198,42	79,44	3,57	37,31	201,0				
5	3	1,77	1,56	20,2	41,0	201,79	82,78	3,57	38,31	180,9				
6	3	1,81	1,59	20,2	39,8	198,02	78,76	3,58	37,05	206,0	196,0	10,8	43,2	42,4
7	3	1,87	1,65	20,9	37,8	202,40	76,43	3,78	35,03	375,3				
8	3	1,90	1,67	20,9	36,8	199,31	73,40	3,78	34,11	378,3				
9	3	1,89	1,67	20,9	37,0	199,79	73,91	3,78	34,27	422,6	392,1	21,6	43,2	84,9
10	5	2,73	1,47	20,1	44,3	198,91	88,21	5,43	39,31	185,4				
11	5	2,75	1,48	20,1	44,0	199,70	87,81	5,49	38,95	226,6				
12	5	2,76	1,49	20,1	43,7	198,42	86,77	5,47	38,72	205,6	205,9	16,8	43,2	44,6
13	5	2,95	1,59	19,7	39,8	198,81	79,06	5,87	34,92	359,3				
14	5	2,96	1,60	19,7	39,6	198,42	78,66	5,87	34,81	346,1				
15	5	2,96	1,60	19,7	39,6	198,11	78,36	5,87	34,72	411,2	372,2	28,1	43,2	80,6
16	5	3,08	1,66	20,1	37,2	201,20	74,84	6,20	32,50	603,7				
17	5	3,12	1,68	20,1	36,4	199,30	72,50	6,22	31,73	711,2				
18	5	3,09	1,67	20,1	37,1	201,60	74,73	6,22	32,38	672,8	662,6	44,5	43,2	143,5
19	7	3,84	1,51	20,2	42,9	196,05	84,19	7,53	36,54	346,8				
20	7	3,80	1,49	20,2	43,6	198,22	86,42	7,53	37,15	402,9				
21	7	3,83	1,50	20,2	43,1	196,64	84,81	7,53	36,71	420,2	390,0	31,4	43,2	84,4
22	7	4,03	1,58	20,6	40,2	198,70	79,81	8,00	33,98	734,2				
23	7	4,07	1,60	20,6	39,5	196,74	77,69	8,01	33,36	749,8				
24	7	4,03	1,58	20,6	40,1	198,52	79,66	8,00	33,95	685,5	723,2	27,4	43,2	156,6
25	7	4,24	1,67	20,2	37,0	201,10	74,37	8,53	31,09	1058,9				
26	7	4,30	1,69	20,2	36,1	197,92	71,42	8,52	30,29	1104,7				
27	7	4,27	1,68	20,2	36,5	199,41	72,83	8,52	30,68	1160,6	1108,1	41,6	43,2	239,9

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela A.2 – Corpos de prova com solo e cal de casca de ovo

Corpo-de-prova	L (%)	Lv (%)	$\gamma_u$	w (%)	$\eta$ (%)	$V_{ep}$ (cm <sup>3</sup> )	$V_v$ (cm <sup>3</sup> )	$V_l$ (cm <sup>3</sup> )	$n/(L_v)^{0,1}$ <sub>2</sub>	$q_u$ (kPa)	$q_u$ (média) (kPa)	Desvio padrão ( $\sigma$ )	$\phi$ (°)	c (kPa)
28	3	1,69	1,48	20,8	44,2	199,21	88,02	3,37	41,48	534,3				
29	3	1,69	1,47	20,8	44,4	199,71	88,67	3,37	41,70	567,4				
30	3	1,70	1,48	20,8	44,1	199,11	87,85	3,38	41,41	538,5	546,7	14,7	43,2	118,4
121	3	1,79	1,56	21,1	40,9	200,10	81,82	3,59	38,12	1222,8				
122	3	1,83	1,59	21,1	39,9	196,44	78,28	3,59	37,07	1214,6				
123	3	1,82	1,58	21,1	40,2	197,92	79,51	3,59	37,40	1038,1	1158,5	85,2	43,2	250,8
34	3	1,91	1,67	20,5	36,9	200,10	73,89	3,83	34,16	2114,7				
35	3	1,92	1,68	20,5	36,6	199,41	73,03	3,84	33,86	2154,1				
36	3	1,91	1,67	20,5	37,0	200,30	74,17	3,83	34,26	2190,2	2153,0	30,8	43,2	466,1
37	5	2,79	1,49	21,1	43,8	197,12	86,30	5,49	38,71	1083,3				
38	5	2,75	1,47	21,1	44,6	199,90	89,14	5,49	39,50	1077,3				
39	5	2,77	1,48	21,1	44,2	198,72	87,83	5,50	39,12	947,6	1036,0	62,6	43,2	224,3
124	5	2,97	1,58	21,1	40,1	197,53	79,29	5,86	35,23	1981,5				
125	5	2,96	1,58	21,1	40,2	197,72	79,48	5,86	35,28	2138,1				
126	5	2,95	1,57	21,1	40,5	199,20	80,71	5,87	35,59	1961,9	2027,1	78,8	43,2	438,9
40	5	3,11	1,66	20,5	37,2	201,09	74,89	6,26	32,50	2723,0				
41	5	3,14	1,68	20,5	36,6	199,71	73,19	6,27	31,95	2782,4				
42	5	3,12	1,67	20,5	37,0	200,50	74,20	6,26	32,28	2880,7	2795,4	65,0	43,2	605,2
43	7	3,84	1,49	20,8	43,6	197,23	85,92	7,58	37,07	1323,6				
44	7	3,81	1,48	20,8	44,1	199,01	87,70	7,58	37,54	1155,9				
45	7	3,77	1,47	20,8	44,5	200,80	89,45	7,58	37,99	1134,0	1204,5	84,7	43,2	260,8
127	7	3,98	1,55	20,9	41,5	202,60	84,01	8,07	35,13	2115,6				
128	7	4,08	1,59	20,9	40,0	197,82	79,14	8,08	33,79	2478,0				
129	7	4,05	1,57	20,9	40,5	199,41	80,75	8,08	34,24	2241,6	2278,4	150,2	43,2	493,3
46	7	4,26	1,65	21,1	37,4	200,80	75,13	8,55	31,45	3185,5				
47	7	4,27	1,66	21,1	37,2	200,60	74,72	8,57	31,29	3003,7				
48	7	4,30	1,67	21,1	36,8	198,80	73,17	8,55	30,89	3081,9	3090,3	74,5	43,2	669,1

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela A.3 – Corpos de prova com solo, cal dolomítica e 12,5% de cinza volante

Corpo-de-prova	L (%)	Lv (%)	$\gamma_u$	w (%)	$\eta$ (%)	$V_{ep}$ (cm <sup>3</sup> )	$V_v$ (cm <sup>3</sup> )	$V_l$ (cm <sup>3</sup> )	$n/(L_v)^{0,1}$	$q_u$ (kPa)	$q_u$ (média) (kPa)	Desvio padrão ( $\sigma$ )	$\phi$ (°)	c (kPa)
49	3	1,50	1,49	20,4	42,2	198,91	83,87	2,99	40,16	120,3				
50	3	1,50	1,48	20,4	42,2	198,91	83,97	2,98	40,21	137,6				
51	3	1,50	1,48	20,4	42,3	198,91	84,07	2,98	40,26	120,9	126,3	8,0	43,2	27,3
130	3	1,59	1,58	19,8	38,6	198,91	76,85	3,17	36,53	224,9				
131	3	1,59	1,58	19,8	38,7	198,91	76,91	3,17	36,57	247,2				
132	3	1,59	1,58	19,8	38,6	198,91	76,68	3,17	36,45	205,6	225,9	17,0	43,2	48,9
52	3	1,68	1,66	20,9	35,3	198,91	70,19	3,34	33,16	440,5				
53	3	1,68	1,67	20,9	35,2	198,91	69,94	3,35	33,03	410,3				
54	3	1,68	1,66	20,9	35,3	198,91	70,26	3,34	33,19	483,2	444,7	29,9	43,2	96,3
55	5	2,46	1,49	20,1	41,9	198,91	83,37	4,90	37,62	305,1				
56	5	2,46	1,49	20,1	41,9	198,91	83,41	4,90	37,63	317,7				
57	5	2,46	1,49	20,1	41,9	198,91	83,41	4,90	37,63	330,4	317,7	10,3	43,2	68,8
133	5	2,62	1,58	19,4	38,2	198,91	75,89	5,22	33,98	535,6				
134	5	2,62	1,58	19,4	38,3	198,91	76,12	5,21	34,09	533,3				
135	5	2,62	1,58	19,4	38,2	198,91	76,08	5,21	34,08	581,1	550,0	22,0	43,2	119,1
58	5	2,78	1,68	20,3	34,5	198,91	68,64	5,52	30,53	763,8				
59	5	2,77	1,67	20,3	34,7	198,91	69,00	5,51	30,70	909,2				
60	5	2,78	1,68	20,3	34,5	198,91	68,71	5,52	30,56	834,6	835,9	59,3	43,2	181,0
61	7	3,39	1,49	19,0	41,7	198,91	82,99	6,75	36,03	518,1				
62	7	3,40	1,49	19,0	41,7	198,91	82,89	6,76	35,98	467,8				
63	7	3,39	1,49	19,0	41,9	198,91	83,28	6,73	36,17	431,5	472,5	35,5	43,2	102,3
136	7	3,60	1,58	19,6	38,2	198,91	75,99	7,16	32,76	847,6				
137	7	3,60	1,58	19,6	38,2	198,91	75,90	7,16	32,72	965,1				
138	7	3,60	1,58	19,6	38,2	198,91	75,99	7,16	32,76	891,7	901,5	48,4	43,2	195,2
64	7	3,85	1,69	18,8	33,8	198,91	67,27	7,67	28,76	1294,6				
65	7	3,85	1,69	18,8	33,8	198,91	67,30	7,66	28,78	1358,1				
66	7	3,85	1,69	18,8	33,9	198,91	67,40	7,66	28,82	1360,8	1337,8	30,6	43,2	289,6

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela A.4 – Corpos de prova com solo, cal de casca de ovo e 12,5% de cinza volante

Corpo-de-prova	L (%)	Lv (%)	$\gamma_u$	w (%)	$\eta$ (%)	$V_{ep}$ (cm <sup>3</sup> )	$V_v$ (cm <sup>3</sup> )	$V_l$ (cm <sup>3</sup> )	$n/(L_v)^{0,1}$	$q_u$ (kPa)	$q_u$ (média) (kPa)	Desvio padrão ( $\sigma$ )	$\phi$ (°)	c (kPa)
67	3	1,53	1,49	19,3	41,8	197,23	82,48	3,01	39,74	668,7				
68	3	1,52	1,49	19,3	42,0	197,63	82,97	3,01	39,92	618,0				
69	3	1,52	1,49	19,3	42,1	198,22	83,43	3,01	40,03	560,3	615,7	44,3	43,2	133,3
139	3	1,60	1,57	19,7	38,9	199,91	77,72	3,21	36,73	1247,5				
140	3	1,61	1,58	19,7	38,5	198,81	76,59	3,21	36,37	1046,3				
141	3	1,61	1,57	19,7	38,7	199,41	77,26	3,21	36,60	1116,1	1136,6	83,4	43,2	246,1
70	3	1,71	1,67	19,4	35,0	200,00	70,09	3,41	32,87	1547,4				
71	3	1,69	1,66	19,4	35,5	201,40	71,41	3,41	33,29	1501,6				
72	3	1,69	1,65	19,4	35,6	201,69	71,78	3,41	33,41	1509,8	1519,6	20,0	43,2	329,0
73	5	2,49	1,49	19,6	41,9	197,42	82,63	4,92	37,51	1224,5				
74	5	2,48	1,48	19,6	42,2	198,61	83,85	4,92	37,86	1128,7				
75	5	2,47	1,47	19,6	42,4	199,41	84,55	4,93	38,04	1089,4	1147,5	56,7	43,2	248,4
142	5	2,64	1,58	19,7	38,4	199,11	76,51	5,26	34,20	1717,3				
143	5	2,66	1,59	19,7	38,0	197,82	75,19	5,26	33,80	1969,7				
144	5	2,62	1,56	19,7	38,9	200,60	78,03	5,26	34,65	1724,8	1803,9	117,2	43,2	390,6
76	5	2,77	1,65	19,7	35,5	201,60	71,53	5,58	31,40	2415,7				
77	5	2,78	1,66	19,7	35,1	200,60	70,41	5,58	31,04	2321,9				
78	5	2,81	1,68	19,7	34,5	198,41	68,54	5,57	30,52	2288,0	2341,9	54,0	43,2	507,0
79	7	3,42	1,48	19,2	41,9	198,42	83,14	6,79	36,15	1198,1				
80	7	3,42	1,48	19,2	41,9	198,81	83,37	6,80	36,18	1143,0				
81	7	3,42	1,48	19,2	42,0	199,21	83,64	6,81	36,23	1147,6	1162,9	25,0	43,2	251,8
145	7	3,64	1,58	19,8	38,2	198,62	75,86	7,23	32,71	2189,3				
146	7	3,67	1,59	19,8	37,7	199,01	75,05	7,30	32,26	2473,0				
147	7	3,63	1,57	19,8	38,4	199,51	76,59	7,24	32,89	2150,9	2271,1	143,7	43,2	491,7
82	7	3,86	1,67	18,4	34,5	201,60	69,56	7,78	29,34	2684,3				
83	7	3,89	1,69	18,4	33,9	199,80	67,80	7,77	28,83	2774,1				
84	7	3,89	1,69	18,4	33,9	199,51	67,63	7,77	28,80	2853,3	2770,6	69,0	43,2	599,9

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela A.5 – Corpos de prova com solo, cal dolomítica e 25% de cinza volante

Corpo-de-prova	L (%)	Lv (%)	$\gamma_u$	w (%)	$\eta$ (%)	$V_{ep}$ (cm <sup>3</sup> )	$V_v$ (cm <sup>3</sup> )	$V_l$ (cm <sup>3</sup> )	$n/(L_v)^{0,1}$ <sub>2</sub>	$q_u$ (kPa)	$q_u$ (média) (kPa)	Desvio padrão ( $\sigma$ )	$\phi$ (°)	c (kPa)
85	3	1,36	1,49	18,7	40,5	198,91	80,51	2,71	39,00	205,6				
86	3	1,36	1,49	18,7	40,4	198,91	80,44	2,71	38,97	164,5				
87	3	1,36	1,49	18,7	40,6	198,91	80,81	2,70	39,16	172,7	180,9	17,8	43,2	39,2
157	3	1,45	1,59	18,6	36,5	198,91	72,52	2,89	34,86	337,2				
158	3	1,45	1,59	18,6	36,7	198,91	73,06	2,88	35,14	393,7				
159	3	1,45	1,59	18,6	36,8	198,91	73,13	2,88	35,17	405,4	378,7	29,8	43,2	82,0
88	3	1,53	1,68	19,0	33,0	198,91	65,56	3,05	31,31	347,6				
89	3	1,53	1,68	19,0	33,1	198,91	65,83	3,04	31,45	315,1				
90	3	1,54	1,68	19,0	32,8	198,91	65,33	3,05	31,19	391,1	351,3	31,1	43,2	76,0
91	5	2,23	1,49	18,3	40,4	198,91	80,26	4,43	36,65	327,6				
92	5	2,23	1,49	18,3	40,3	198,91	80,09	4,44	36,57	374,9				
93	5	2,24	1,50	18,3	40,1	198,91	79,79	4,45	36,42	403,7	368,8	31,4	43,2	79,8
160	5	2,37	1,59	18,9	36,5	198,91	72,61	4,72	32,91	655,2				
161	5	2,37	1,58	18,9	36,6	198,91	72,72	4,72	32,96	696,6				
162	5	2,37	1,58	18,9	36,6	198,91	72,85	4,71	33,02	685,3	679,0	17,5	43,2	147,0
94	5	2,55	1,70	17,5	31,8	198,91	63,17	5,07	28,38	849,8				
95	5	2,55	1,71	17,5	31,7	198,91	63,04	5,08	28,32	882,5				
96	5	2,55	1,70	17,5	31,8	198,91	63,17	5,07	28,38	875,1	869,2	14,0	43,2	188,2
97	7	3,07	1,49	18,7	40,2	198,91	79,97	6,10	35,14	705,8				
98	7	3,07	1,49	18,7	40,1	198,91	79,73	6,12	35,03	651,3				
99	7	3,07	1,49	18,7	40,1	198,91	79,73	6,12	35,03	704,0	687,0	25,3	43,2	148,7
163	7	3,28	1,59	18,5	36,1	198,91	71,87	6,52	31,33	961,5				
164	7	3,28	1,59	18,5	36,1	198,91	71,87	6,52	31,33	980,5				
165	7	3,28	1,59	18,5	36,1	198,91	71,76	6,52	31,28	853,2	931,8	56,1	43,2	201,7
100	7	3,47	1,68	18,9	32,3	198,91	64,25	6,91	27,82	1243,6				
101	7	3,47	1,68	18,9	32,3	198,91	64,32	6,91	27,85	1194,3				
102	7	3,47	1,68	18,9	32,4	198,91	64,49	6,90	27,93	1339,2	1259,0	60,2	43,2	272,6

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela A.6 – Corpos de prova com solo, cal de casca de ovo e 25% de cinza volante

Corpo-de-prova	L (%)	L <sub>v</sub> (%)	γ <sub>u</sub>	w (%)	η (%)	V <sub>ep</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>v</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>l</sub> (cm <sup>3</sup> )	$n/(L_v)^{0,1}$ <sub>2</sub>	q <sub>u</sub> (kPa)	q <sub>u</sub> (média) (kPa)	Desvio padrão (σ)	φ (°)	c (kPa)
103	3	1,37	1,49	18,6	40,7	198,91	81,00	2,73	39,21	625,0				
104	3	1,37	1,48	18,6	40,8	198,91	81,17	2,72	39,30	717,9				
105	3	1,37	1,49	18,6	40,7	198,91	80,90	2,73	39,16	652,6	665,2	39,0	43,2	144,0
148	3	1,46	1,58	18,7	36,9	198,91	73,47	2,90	35,30	1089,8				
149	3	1,46	1,58	18,7	36,8	198,91	73,26	2,91	35,19	1153,6				
150	3	1,46	1,58	18,7	36,8	198,91	73,20	2,91	35,16	1110,1	1117,8	26,6	43,2	242,0
106	3	1,55	1,68	18,8	33,1	198,91	65,84	3,08	31,41	1506,8				
107	3	1,55	1,68	18,8	33,0	198,91	65,67	3,08	31,32	1414,6				
108	3	1,55	1,68	18,8	33,1	198,91	65,94	3,08	31,46	1369,7	1430,4	57,1	43,2	309,7
109	5	2,24	1,48	19,2	40,7	198,91	80,87	4,46	36,90	1337,7				
110	5	2,24	1,48	19,2	40,6	198,91	80,77	4,47	36,85	1268,9				
111	5	2,24	1,48	19,2	40,6	198,91	80,80	4,46	36,87	1249,9	1285,5	37,7	43,2	278,3
151	5	2,37	1,57	20,0	37,2	198,91	73,93	4,72	33,50	1776,8				
152	5	2,38	1,57	20,0	37,1	198,91	73,76	4,73	33,42	1605,4				
153	5	2,38	1,57	20,0	37,1	198,91	73,79	4,73	33,44	1689,1	1690,4	70,0	43,2	366,0
112	5	2,54	1,67	19,0	32,9	198,91	65,46	5,04	29,43	2190,1				
113	5	2,54	1,68	19,0	32,7	198,91	64,99	5,06	29,21	2203,9				
114	5	2,53	1,67	19,0	32,9	198,91	65,52	5,04	29,46	2177,2	2190,4	10,9	43,2	474,2
115	7	3,11	1,49	18,6	40,2	198,91	79,86	6,18	35,05	1316,1				
116	7	3,11	1,49	18,6	40,1	198,91	79,80	6,18	35,01	1300,8				
117	7	3,11	1,49	18,6	40,1	198,91	79,73	6,18	34,98	1409,0	1342,0	47,8	43,2	290,5
154	7	3,30	1,58	19,3	36,5	198,91	72,57	6,56	31,62	1973,1				
155	7	3,29	1,58	19,3	36,5	198,91	72,67	6,55	31,66	2241,6				
156	7	3,29	1,58	19,3	36,6	198,91	72,77	6,55	31,71	2302,8	2172,5	143,2	43,2	470,4
118	7	3,51	1,68	19,2	32,3	198,91	64,22	6,99	27,77	2280,0				
119	7	3,49	1,67	19,2	32,7	198,91	65,06	6,95	28,15	2228,2				
120	7	3,48	1,67	19,2	32,9	198,91	65,37	6,93	28,29	2491,3	2333,2	113,8	43,2	505,2

Fonte: elaborado pelo autor