



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - ECV
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DOUGLAS KAÍPO DOMINGUES

**Análise do comportamento mecânico de uma areia estabilizada com ligantes
convencionais e sustentáveis.**

Florianópolis
2023

Douglas Kaípo Domingues

**Análise do comportamento mecânico de uma areia estabilizada com ligantes
convencionais e sustentáveis.**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Naloan Coutinho Sampa.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Kaipo Domingues, Douglas
Análise do comportamento mecânico de uma areia
estabilizada com ligantes convencionais e sustentáveis. /
Douglas Kaipo Domingues ; orientador, Naloan Coutinho
Sampa, 2023.
110 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Estabilização de solos. 3.
Sustentabilidade. 4. Solo arenoso. I. Coutinho Sampa,
Naloan. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Douglas Kaípo Domingues

**Análise do comportamento mecânico de uma areia estabilizada com ligantes
convencionais e sustentáveis.**

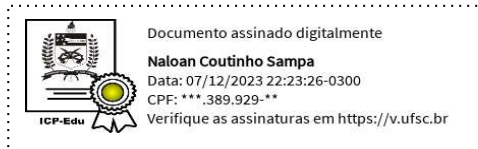
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título do Título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 01 de Dezembro de 2023.



Prof^a. Liane Ramos da Silva, Dr^a.
Coordenadora do Curso de Graduação

Banca examinadora



Prof. Naloan Coutinho Sampa, Dr.

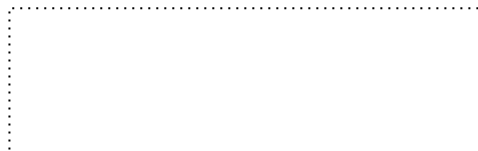
Orientador



Prof. Rafael Higashi, Dr.

Avaliador

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Marcos Noronha, Dr.

Avaliador

Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2023.

Dedico este trabalho ao meu pai, José, e à minha mãe, Aparecida, pilares fundamentais em minha trajetória. Com carinho e dedicação, eles me guiaram com disciplina, não poupando esforços para assegurar um futuro promissor para mim. Esses valores são tesouros que carregarei para toda a vida.

AGRADECIMENTOS

Desde o ensino fundamental, na antiga sétima série, meu sonho era ser engenheiro civil. Poder realiza-lo, através de muito esforço e dedicação, na Universidade Federal de Santa Catarina é de imensa gratidão.

Como forma de agradecimento, primeiramente sou grato à Deus por me dar força para que eu conquiste os meus objetivos. Em segundo lugar, aos meus familiares e amigos. Em especial ao meu pai, que sempre esteve do meu lado em todo processo e a minha mãe, por me educar e se dedicar incansavelmente em me proporcionar um futuro brilhante. Uma pessoa que não poderia ficar de fora, é a minha namorada, que tem um papel fundamental neste trabalho e se dedica em edificar o nosso futuro de forma doce e especial.

Sinto-me privilegiado por poder contar com o professor Naloan como meu orientador. Na instituição de ensino, tive a oportunidade de conviver com pessoas notáveis de mentes brilhantes, sendo o professor Naloan um verdadeiro exemplo, caracterizado por sua solicitude e paciência.

Por fim, expresso minha gratidão à Universidade Federal de Santa Catarina, a todos os professores e servidores, que conduzem de forma magistral o processo de ensino na instituição.

Encerro assim um ciclo marcante em minha vida, repleto de novas amizades e relações concretizadas. À UFSC, agradeço por tornar realidade meu sonho em uma das mais respeitadas e prestigiadas universidades da América Latina.

“A mente que se abre para uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original”

- Albert Einstein

RESUMO

O contexto da mudança climática e a busca pelo desenvolvimento sustentável exigem não apenas a revisão de políticas públicas, mas também avanços nas técnicas construtivas e inovações em materiais mais sustentáveis. Por outro lado, o crescimento urbano e a expansão da infraestrutura, no entanto, impõem desafios em regiões com solos instáveis. A estabilização química, através da adição de cal e/ou cimento Portland, tem sido uma solução eficaz para melhorar o comportamento desses solos. No entanto, o alto impacto ambiental associado à produção e transporte desses agentes cimentantes impulsiona a busca por alternativas mais sustentáveis. Este estudo responde à necessidade de abordagens ambientalmente conscientes na estabilização de solos, investigando os comportamentos mecânicos de um solo arenoso estabilizado com cimento Portland, cal hidratada comercial e cal produzida a partir de cascas de ovos. Foram analisados os efeitos do tipo e teor de agente cimentante, do tempo de cura e da energia de compactação no comportamento das misturas solo-cimento e solo-cimento-cal. O trabalho apresenta e discute os principais resultados de caracterização física e análises químicas da areia, cimento e cales, bem como as influências das variáveis analisadas nos valores das resistências à compressão simples e à compressão diametral das misturas. A adição somente de cimento no solo contribui de forma significativa para aumento das resistências do solo. No entanto, a adição de cal, tanto comercial quanto de casca de ovo, impactou negativamente as resistências das misturas nos tempos de 7 dias e 28 dias, possivelmente devido à retarda nas reações pozolânicas. Expressões para dosagem racional foram estabelecidas a partir da relação entre resistências e a razão entre porosidade e teor volumétrico de agentes cimentantes. Em suma, este estudo pode contribuir para a produção e o entendimento da cal de casca de ovo, assim como para o entendimento do comportamento mecânico de solos arenosos estabilizados com cimento Portland e cales.

Palavras-chave: Areia, solo estabilizado, cal hidratada, cal de casca de ovo, cimento Portland, Compressão simples e diametral.

ABSTRACT

The context of climate change and the pursuit of sustainable development demands not only a review of public policies but also advancements in construction techniques and innovations in more sustainable materials. On the other hand, urban growth and infrastructure expansion pose challenges in regions with unstable soils. Chemical stabilization, through the addition of lime and/or Portland cement, has proven to be an effective solution to enhance the behavior of these soils. However, the environmental impact associated with the production and transportation of these cementing agents drives the search for more sustainable alternatives. This study responds to the need for environmentally conscious approaches in soil stabilization, investigating the mechanical behaviors of a sandy soil stabilized with Portland cement, commercial hydrated lime, and lime produced from eggshells. The effects of the type and content of cementing agent, curing time, and compaction energy on the behavior of soil-cement and soil-cement-lime mixtures were analyzed. The study presents and discusses the main results of physical characterization and chemical analyses of sand, cement, and limes, as well as the influences of the analyzed variables on the values of compressive strength and diametral compression of the mixtures. The addition of only cement significantly contributes to increasing the soil's strengths. However, the addition of lime, both commercial and from eggshells, negatively impacted the mixtures' strengths at 7 and 28 days, possibly due to delays in pozzolanic reactions. Rational dosing expressions were established based on the relationship between strengths and the ratio of porosity to volumetric content of cementing agents. In summary, this study can contribute to the production and understanding of eggshell lime, as well as the understanding of the mechanical behavior of sandy soils stabilized with Portland cement and limes.

Keywords: Sand, stabilized soil, hydrated lime, eggshell lime, Portland cement, compressive strength, diametral compression.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diagrama de delineamento da pesquisa.....	27
Figura 2 - Ganhos de resistência com o tempo para distintos tipos de cimento Portland.	30
Figura 3 - Tipo de agente cimentante em função do solo.....	32
Figura 4 - Variação da resistência à compressão simples em função da razão de volumes.	33
Figura 5 - Emissão de CO ₂ da Indústria Mineral.....	35
Figura 6 - Processo de troca catiônica.	38
Figura 7 - Estabilização de solo-cal.....	38
Figura 8 - a) evolução da produção de ovos no Brasil e b) destino da produção brasileira de ovos em 2022.....	41
Figura 9 - a) evolução da produção de ovos no Brasil e b) destino da produção brasileira de ovos em 2022.....	42
Figura 10 - Representação das partes constituintes da casca de ovo.....	43
Figura 11 - Etapas da metodologia de pesquisa	48
Figura 12 - Cimento utilizado na pesquisa.	51
Figura 13 - Cal utilizada na pesquisa.	52
Figura 14 - a) Tubo de PVC para a limpeza das cascas de ovo, b) Secagem das cascas em estufa.....	53
Figura 15 - Jarro e bolas de porcelanas.	53
Figura 16 - Casca de ovo moída e o processo de armazenamento.	54
Figura 17 - Processo de mistura e de quarteamento da casca de ovo moída.	54
Figura 18 - Pesagem de casca de ovo moída, cascas dentro do forno e a pesagem da cinza. ..	56
Figura 19 - Hidratação da cal, cal hidratada após a moagem e cal hidratada identificada e armazenada.	56
Figura 20 - a) conjunto de peneiras e b) cilindro e soquetes do ensaio de compactação.	57
Figura 21 - Equipamento DRX.....	58
Figura 22 - Preparação dos materiais para a análise DRX.	58
Figura 23 – Medidor de pH.	59
Figura 24 - Materiais para a medição de pH.	59
Figura 25 - Pesagem de materiais para a composição do corpo-de-prova.	61
Figura 26 - Processo de pesagem e mistura do solo, cimento e água.....	62
Figura 27 - Pesagem do material de uma camada e cápsulas na estufa.....	62
Figura 28 - Preparação do molde metálico para o ensaio de compactação.	63

Figura 29 - Etapas de compactação.	63
Figura 30 - Medições de um corpo-de-prova após a compactação.	64
Figura 31- Acondicionamento e submersão de corpos-de-prova.	65
Figura 32 - Corpos-de-prova após submersão, ensaio de compressão simples e compressão diametral.	66
Figura 33 - Curva granulométricas da areia.	67
Figura 34 - Curva granulométrica da casca de ovo.	68
Figura 35 - Curva granulométrica do cimento Portland.	69
Figura 36 - Curva granulométrica das cales.	69
Figura 37 - Curva de compactação da areia.	70
Figura 38 - Variação de pH em função do teor de cimento.	71
Figura 39 – Variação do pH ao longo do tempo da mistura solo-cimento-cal comercial (CHC).	72
Figura 40 - Variação do pH ao longo do tempo da mistura solo-cimento-cal CCO - I.	73
Figura 41 - Variação do pH ao longo do tempo da mistura solo-cimento-cal CCO - II.	74
Figura 42 - Espectro de DRX da areia.	74
Figura 43 - Espectro de DRX do cimento Portland.	75
Figura 44 - Espectro de DRX da cal hidratada comercial.	75
Figura 45 - Espectro de DRX para a cal hidratada produzida a partir da casca de ovo.	76
Figura 46 - Variação da qu em função do teor de cimento para tempo de cura de 7 dias.	77
Figura 47 - Variação da qu em função do peso específico para tempo de cura de 7 dias.	78
Figura 48 - Comparação dos valores de qu para diferentes pesos específicos e teores de cimento - 7 dias.	78
Figura 49 - Variação da qu em função do teor de cimento para tempos de cura de 7 dias e 28 dias.	79
Figura 50 - Razão entre $qu, 28 \text{ dias}$ e $qu, 7 \text{ dias}$ para diferentes teores de cimento e peso específico seco de	79
Figura 51 - Variação de qt em função do teor de cimento para tempo de cura de 7 dias.	80
Figura 52 - Variação da qt em função do peso específico seco para tempo de cura de 7 dias.	81
Figura 53 - Comparação dos valores de qt para diferentes pesos específicos e teores de cimento para tempo de cura de 7 dias.	81
Figura 54 - Variação da qt em função do teor de cimento para tempos de cura de 7 dias e 28 dias em um peso específico seco de 16 kN/m^3	82

Figura 55 - Relação entre q_t , 28 dias e q_t , 7 dias para diferentes teores de cimento em um peso específico seco de.....	83
Figura 56 - Razão entre q_t e q_u para diferentes pesos específicos e teores de cimento para tempo de cura de.....	84
Figura 57 - Razão entre q_t e q_u para diferentes teores de cimento para tempo de cura de 28 dias.....	84
Figura 58 - Relação entre q_u e a razão η_{Civ} para um tempo de cura de 7 dias.....	85
Figura 59 - Relação entre a q_u e a razão η_{Civ} para um tempo de cura de 28 dias.....	86
Figura 60- - Relação entre a q_t e a razão η_{Civ} para um tempo de cura de 7 dias.....	86
Figura 61 - Relação entre q_t e a razão η_{Civ} para um tempo de cura de 28 dias.....	87
Figura 62 - Variação da q_u em função do teor de cal para teor de cimento de 5%, peso específico seco de 16kN/m ³ e tempo de cura de 7 dias.	88
Figura 63 - Variação da q_u em função do teor de cal para teor de cimento de 5%, peso específico seco de 16kN/m ³ e tempo de cura de 28 dias.	88
Figura 64 - Variação da q_t em função do teor de cal para teor de cimento de 5%, peso específico seco de 16kN/m ³ e tempo de cura de 7 dias.	90
Figura 65- Variação da q_t em função do teor de cal para teor de cimento de 5%, peso específico seco de 16kN/m ³ e tempo de cura de 28 dias.	90
Figura 66 - Razão entre q_u de 28 dias e q_u de 7 dias para diferentes teores e tipo de cal.	91
Figura 67 - Razão entre q_t de 28 dias e q_t de 7 dias para diferentes teores e tipo de cal.	92
Figura 68 - Razão entre q_t e q_u para diferentes teores de cimento para tempo de cura de 7 dias.....	93
Figura 69 - Razão entre q_t e q_u para diferentes teores de cimento para tempo de cura de 28 dias.....	93
Figura 70 - Relação entre q_u das misturas com cal de casca de ovo e das misturas com cal comercial para um tempo de cura de 7 dias.....	94
Figura 71 - Relação entre q_u das misturas com cal de casca de ovo e das misturas com cal comercial para um tempo de cura de 28 dias.....	95
Figura 72 - Relação entre q_t das misturas com cal de casca de ovo e das misturas com cal comercial para um tempo de cura de 7 dias.....	95
Figura 73 - Relação entre q_t das misturas com cal de casca de ovo e das misturas com cal comercial para um tempo de cura de 28 dias.....	96
Figura 74 – Razão entre q_u , CP + C e q_u , CP para tempo de cura de 7 dias.....	97

Figura 75 - Razão entre $q_u, CP + C$ e q_u, CP para tempo de cura de 28 dias..	97
Figura 76 - Razão entre $q_t, CP + C$ e q_t, CP para tempo de cura de 7 dias.	98
Figura 77 - Razão entre $q_t, CP + C$ e q_t, CP para tempo de cura de 28 dias	99
Figura 78 - Relação entre q_u e a razão η_{Liv} para misturas com CHC.	100
Figura 79 - Relação entre q_u e a razão η_{Liv} para misturas com CCO-I.	100
Figura 80 - Relação entre q_u e a razão η_{Liv} para misturas com CCO-II.	101
Figura 81 - Relação entre q_t e a razão η_{Liv} para misturas com CHC.	101
Figura 82 - Relação entre q_t e a razão η_{Liv} para misturas com CCO-I.	102
Figura 83 - Relação entre q_t e a razão η_{Liv} para misturas com CCO-II.	102
Figura 84 - Relação entre q_u e a razão η_{Biv} para misturas com CHC.	103
Figura 85 - Relação entre q_u e a razão η_{Biv} para misturas com CCO-I.	103
Figura 86 - Relação entre q_u e a razão η_{Biv} para misturas com CCO-II.	104
Figura 87 - Relação entre q_t e a razão η_{Biv} para misturas com CHC.	104
Figura 88 - Relação entre q_t e a razão η_{Biv} para misturas com CCO-I.	105
Figura 89 - Relação entre q_t e a razão η_{Biv} para misturas com CCO-II.	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Exigências químicas.	36
Tabela 2 - Exigências físicas.	36
Tabela 3- Teores de cal para melhoramento e estabilização dos solos.	39
Tabela 4 - Composição química de casca de ovo.	43
Tabela 5 - Resultado DRX para a casca de ovo após o processo de secagem.....	44
Tabela 6 - Composição química de cinza de casca de ovo.....	45
Tabela 7 - Composição química de cal de casca de ovo hidratada.....	46
Tabela 8 - Variáveis da pesquisa e os seus níveis.	49
Tabela 9 - Caracterização das variáveis.	50
Tabela 10 - Propriedades químicas do cimento CP V – ARI.	51
Tabela 11 - Propriedades físicas e mecânicas do cimento CP V – ARI.....	51
Tabela 12 - Resumo da atividade laboratorial para análise da resistência mecânica.	60
Tabela 13 - Propriedades físicas das Areias A e B.....	68

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPA	Associação Brasileira de Proteína Animal
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAH	Aluminatos Hidratados de Cálcio
CBR	Califórnia Bearing Ratio
CCO	Cal de Casca de Ovo
CCO – I	Casca de Ovo incinerada em uma temperatura de 900 °C
CCO – II	Casca de Ovo incinerada em uma temperatura de 1000 °C
CD	Compressão Diametral
CH	Cal Hidratada
CHC	Cal Hidratada Comercial
CP	Cimento Portland
CP V-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial do tipo V
CS	Compressão Simples
CSH	Silicatos Hidratados de Cálcio
DRX	Difratometria de Raios-X
DRX	Difração de Raios-X
GEE	Gases de Efeito Estufa
ICL	Initial Consumption of Lime
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LDRX	Laboratório Multiusuário de Difração de Raios X
LEMA	Laboratório de Energia e Meio Ambiente
LFP	Lime Fixation Point
LL	Limite de Liquidez
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LP	Limite de Plasticidade
NANOTEC	Laboratório de Aplicações de Nanomateriais em Construções

NBR	Norma Brasileira
pH	Potencial Hidrogeniônico.
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USCS	Unified Soil Classification System

LISTA DE SÍMBOLOS

C_{iv}	Teor Volumétrico de Cimento
L_{iv}	Teor Volumétrico de Cal
V_V	Volume Absoluto de Vazios
V_c	Volume Absoluto de Cimento
q_u	Resistência à Compressão Simples
q_t	Resistência à Compressão Diametral
q_u	Resistência à Compressão Simples
γ_d	Peso Específico Seco
η	Porosidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
1.1	JUSTIFICATIVA	26
1.2	OBJETIVO GERAL	26
1.2.1	Objetivos Específicos	26
1.3	ETAPAS E ESTRUTURA DO TRABALHO.....	27
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CIMENTO PORTLAND.....	29
2.2	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL COMERCIAL	35
2.3	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL DE CASCAS DE OVO.....	41
3	METODOLOGIA.....	48
3.1	ETAPAS DE METODOLOGIA	48
3.2	DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS E DOS TIPOS DE ENSAIOS	49
3.3	DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS E OS MÉTODOS DOS ENSAIOS	50
3.3.1	Descrição dos Materiais	50
3.3.2	Ensaio de Caracterização Física.....	56
3.3.3	Ensaio de Caracterização Química	57
3.3.4	Ensaio de Caracterização Mecânica.....	59
4	RESULTADOS	67
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	67
4.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	71
4.3	RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO SIMPLES E COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	76
4.3.1	Mistura Solo-Cimento	76
4.3.2	Mistura Solo-Cimento-Cal	87
5	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
6	REFERÊNCIAS	108

1 INTRODUÇÃO

Os solos, sendo materiais abundantes na natureza e de baixo custo, utilizados na engenharia como suporte para fundações de edifícios, pontes e viadutos, subleitos de rodoferrrovias, além de serem utilizados como materiais de construção em obras de terra. No entanto, com o crescimento das cidades e a expansão das malhas rodoferroviárias, cresce a necessidade de construir em regiões com solos classificados como problemáticos, tais como solos moles, solos expansíveis, solos fofos, solos colapsáveis e solos orgânicos. Esses solos apresentam características desafiadoras para a implantação e bom funcionamento de obras de engenharia.

Para contornar tais limitações, os engenheiros recorrerem geralmente às diversas alternativas, como a remoção parcial ou total do solo, ajuste de projetos para contemplar as limitações do solo natural ou melhoramento das propriedades do solo local para atender às exigências do projeto, como explica Cristelo (2001).

No que refere à melhoria das propriedades do solo natural, diversas técnicas são empregadas, incluindo a estabilização por processos químicos. Essa técnica envolve a adição de ligantes químicos - cimento Portland, cal, pozolanas, materiais betuminosos, resinas, etc. - para promover reações químicas ou interações físicas responsáveis pela melhoria de uma ou mais propriedade do solo natural. O cimento Portland e a cal destacam-se como os principais agentes cimentantes utilizados para essa finalidade.

Apesar da ampla utilização desses agentes cimentantes, suas cadeias produtivas ainda demandam alta energia, consomem recursos naturais significativos e geram emissões de gases de efeito estufa. Diante deste cenário, há um crescente interesse em explorar e utilizar alternativas sustentáveis de agentes cimentantes para melhorar as características geotécnicas de solos naturais.

No contexto do desenvolvimento sustentável, é imperativo reaproveitar e utilizar de maneira adequada os resíduos originados de processos industriais, de construção e domésticos em diversas áreas, incluindo a geotecnia. Nesse sentido, estudos que investigam a utilização de cal derivada de casca de ovo para a estabilização de solos ganham destaque. Esses estudos visam oferecer vantagens como economia de energia, reaproveitamento de resíduos, redução de custos, conservação de recursos naturais, minimização do impacto ambiental e melhoria nas características do solo.

Dentro desse contexto, este trabalho concentra-se em estudar o comportamento de um solo arenoso estabilizado com cimento Portland, cal comercial e cal derivada de casca de ovo. Aborda detalhadamente o processo de produção de cal a partir de casca de ovo e analisa as influências do tipo e teor de agente cimentante, peso específico seco e tempo de cura nas resistências à compressão simples e diametral. O trabalho conclui apresentando expressões derivadas em curvas normalizadas como alternativas racionais para dosagens de solos estabilizados nas mesmas condições.

1.1 JUSTIFICATIVA

A realização deste estudo é motivada pela urgente e crescente demanda por materiais mais sustentáveis na estabilização de solos utilizados em pavimentos rodoviários, proteção de taludes e como camada de suporte para fundações superficiais. Além disso, a necessidade de compreender o comportamento mecânico de solos estabilizados e desenvolver métodos racionais de dosagem justificam a relevância deste trabalho.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste estudo é investigar os comportamentos físico-mecânicos de um solo arenoso estabilizado utilizando cimento Portland, cal hidráulica comercial e cal produzida no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC a partir de resíduos de casca de ovo.

1.2.1 Objetivos Específicos

Em consonância com o objetivo geral, os objetivos específicos são os seguintes:

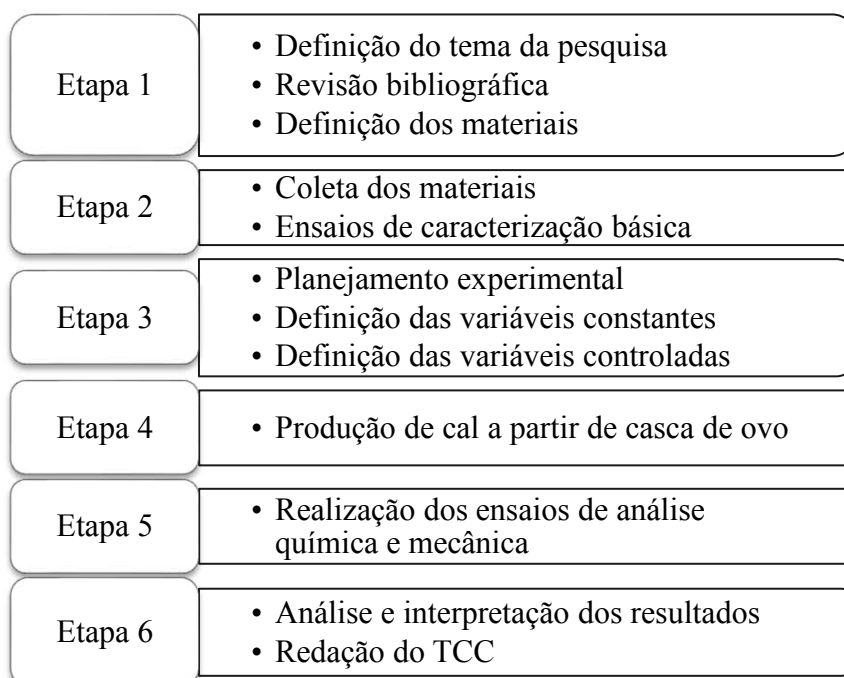
- Produzir, em laboratório, cal hidráulica a partir de resíduos de casca de ovo;
- Analisar as principais propriedades físicas e químicas da areia e dos agentes cimentantes;
- Avaliar a influência do teor cimento, teor das cales, tipo de cal, tempo de cura e porosidade nas resistências à compressão simples e compressão diametral;

- Estabelecer métodos racionais de dosagem para areias estabilizadas, considerando relações entre resistências e a razão entre a porosidade e teor volumétrico dos agentes cimentantes.

1.3 ETAPAS E ESTRUTURA DO TRABALHO

A Figura 1 exibe o diagrama de delineamento, destacando as principais fases adotadas neste estudo, cujos pormenores são abordados no capítulo 3.

Figura 1- Diagrama de delineamento da pesquisa.



Fonte: autor, 2023.

A estrutura do trabalho é organizada em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

- Capítulo 1 – Introdução: Este capítulo contextualiza o tema da pesquisa, fornecendo uma visão geral do assunto do trabalho. Apresenta a justificativa para o estudo, estabelece os objetivos gerais e específicos e explica a estrutura do trabalho;

- Capítulo 2 – Fundamentação Teórica: Este capítulo baseia-se na revisão da literatura e fornece informações detalhadas sobre o melhoramento de solos com cimento Portland, cal comercial e cal de casca de ovo;
- Capítulo 3 - Metodologia: Este capítulo descreve minuciosamente todos os procedimentos, normas e diretrizes seguidos durante o planejamento experimental, produção da cal, e realização dos ensaios;
- Capítulos 4 e 5 – Resultados e Conclusões: Estes capítulos apresentam uma síntese dos principais resultados obtidos, juntamente com as conclusões do trabalho. Além disso, são apresentadas as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda os principais conceitos relacionados à estabilização de solos com cimento Portland, cal hidratada comercial e cal hidratada produzida a partir de casca de ovo.

2.1 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CIMENTO PORTLAND

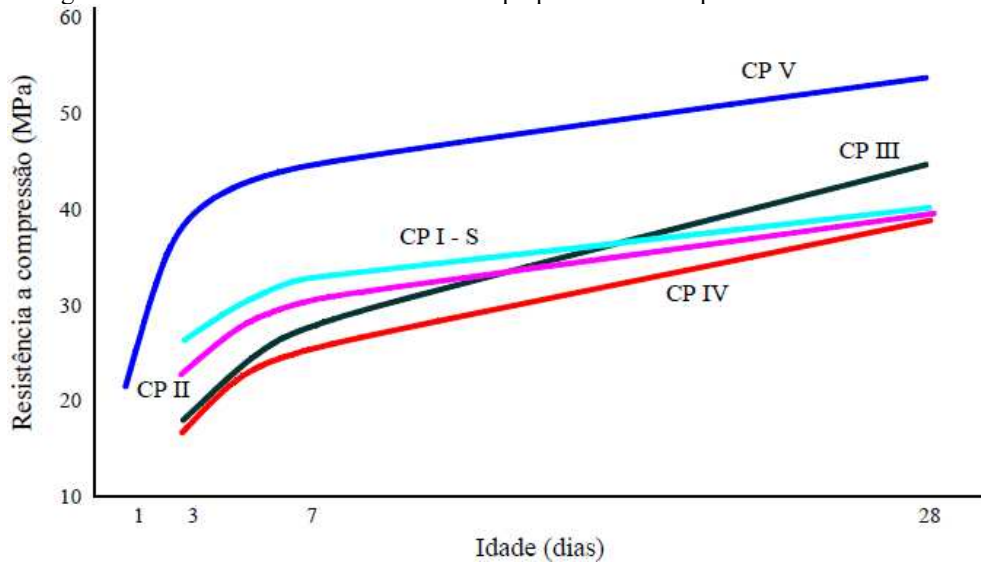
A utilização de cimentos para a estabilização de solos tem suas raízes nos Estados Unidos da América desde 1915. Vários estudos e trabalhos, incluindo os de Kézdi (1979), Senço (2001), ACI (2009), Vendruscolo (2003), Foppa (2005) e Dornelles (2020), apresentaram estudos ou casos de obras que envolvem a estabilização de solos mediante a adição de cimentos. Esses casos abrangem pavimentação de ruas e estradas, proteção de taludes contra erosão, melhoramento ou estabilização de solos, revestimento de barragens, reforço em aterros, entre outros.

Solo-cimento consiste em um produto endurecido, resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem (NBR 12024:2012; NBR12253:2012). O cimento Portland, um ligante hidráulico, é um dos materiais mais utilizados para a estabilização dos solos. Conforme a NBR 16697:2018, o cimento Portland é obtido pela moagem de clínquer, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais nos teores estabelecidos pela mesma Norma. Coutinho (1973) complementa que esse tipo de cimento é um composto composto por óxidos de cálcio, silício, alumínio e ferro, derivados de matérias-primas como calcário, argila e gesso.

As informações sobre as designações normalizadas, siglas e classes, além dos limites de composição, requisitos químicos, físicos e mecânicos do cimento Portland estão disponíveis na norma NBR 16697:2018.

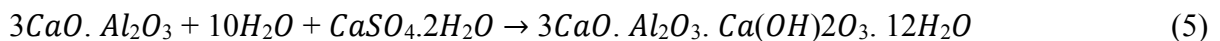
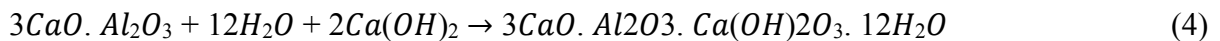
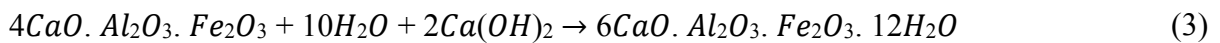
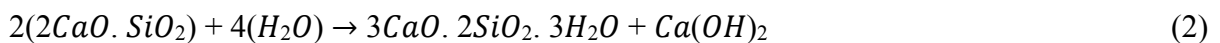
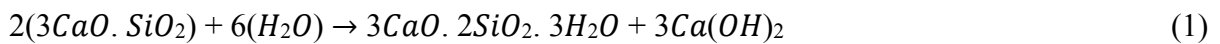
A Figura 2 compara os ganhos de resistência ao longo do tempo para diversos tipos de cimento Portland.

Figura 2 - Ganhos de resistência com o tempo para distintos tipos de cimento Portland.



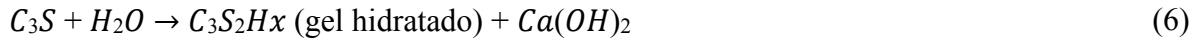
Fonte: ABCP (1996).

As reações resultantes da adição de cimento ao solo (Equações 1 a 5) foram descritas por Moh (1965) e Bergado et al. (1996). De acordo com os autores, após a hidratação da mistura solo-cimento, ocorre a formação de cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), silicatos hidratados de cálcio (CSH) e aluminatos hidratados de cálcio (CAH). Os géis de tobermorita e cal hidratada, conforme ilustrado nas Equações 1 e 2, são os principais responsáveis pelo aumento da resistência nas misturas solo-cimento.



Moh (1965) e Bergado et al. (1996) também incluíram as Equações 6 a 9, que representam outras reações que ocorrem ao longo do tempo. Na Equação 6, descrevem-se as reações primárias de hidratação com o silicato tricálcico (C_3S). A Equação 7 aborda a hidrólise com a dissolução dos íons de cálcio excedentes da hidratação. Nas Equações 8 e 9,

são apresentadas as reações secundárias com a sílica e a alumina em estado amorfo presentes no solo, resultando na formação de silicatos de cálcio hidratado (CSH) e aluminatos de cálcio hidratado (CAH).



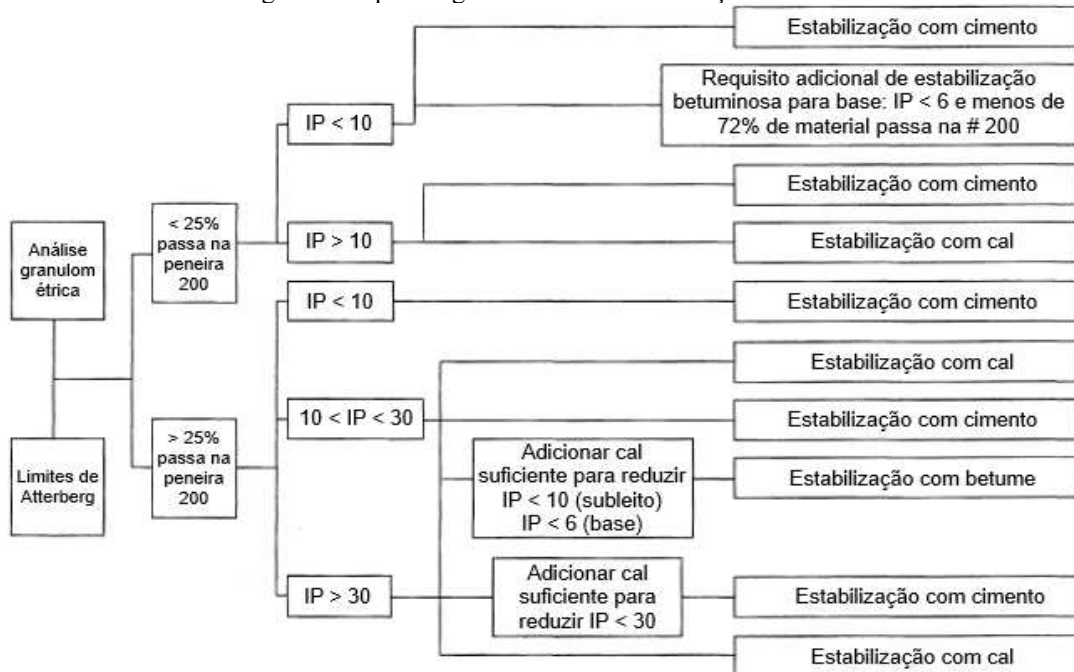
Mindess et al. (2003) explicaram que, nos primeiros dias, as reações de hidratação do cimento ocorrem em intensidade decrescente, seguindo a ordem dos seguintes produtos cimentantes na forma anidra: $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$, onde C=CaO, S=SiO₂, A=Al₂O₃ e F=Fe₂O₃. É importante destacar que a presença de sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃) desempenha um papel fundamental na obtenção de misturas com elevadas resistências.

Em termos de eficiência, Ingles e Metcalf (1972) afirmam que solos bem graduados, arenosos e com baixa a média plasticidade são mais adequados para a estabilização com cimento Portland, pois facilitam a mistura, exigem baixas proporções de cimento e resultam em maiores resistências após a estabilização. Nuñez (1991) explica que o mecanismo resultante da adição de cimento em solos granulares é semelhante ao que ocorre com o cimento no concreto. Por outro lado, Herzog e Mitchel (1963) esclarecem que as reações em misturas de solos argilosos com cimento promovem o endurecimento devido à cimentação das partículas de argila pelos produtos da hidratação do cimento.

De acordo com a NBR 11798, solos susceptíveis à estabilização com cimento devem se enquadrar preferencialmente nas classificações A-1, A-2, A-3 e A-4 da AASHTO e conter 100% de material que passa na peneira com abertura de malha de 75 mm, máximo de 30% de material retido na peneira com abertura de malha de 19 mm e máximo de 40% de material retido na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

A Figura 3 elaborada por Curin et al. (1976) permite selecionar os agentes cimentantes mais adequados para estabilizar diversos tipos de solos, dependendo da granulometria e do índice de plasticidade.

Figura 3 - Tipo de agente cimentante em função do solo.



Fonte: Currin et al. (1976).

Croft (1967) realizou uma análise da influência da composição química e mineralógica de solos argilosos e observou que argilas caulínicas ou ílticas podem ser consideradas inertes e apresentam ganho de resistência com quantidades econômicas de cimento. Por outro lado, argilas com altos teores de montmorilonita retardam a hidratação e o endurecimento do cimento, tornando a estabilização com cal a opção mais eficiente. Em geral, todos os tipos de solo podem ser estabilizados com cimento, porém os solos arenosos são mais eficientes do ponto de vista econômico, pois requerem baixas quantidades de cimento para a sua estabilização.

De acordo com Kosmatka et al. (2002), a quantidade de cimento deve ser suficiente para conferir determinadas propriedades mecânicas e de durabilidade às misturas, após a compactação com um teor específico de água que garanta a hidratação adequada do cimento. Tanto o PCA (2002) quanto a NBR 12253:2012 recomendam que a moldagem de corpos-de-prova para ensaios de compressão simples seja realizada com pelo menos três teores de cimento diferentes, a fim de determinar o menor teor que atenda ao critério de resistência mínima de 2,1 MPa aos 7 dias de cura.

Os teores de cimento sugeridos pela NBR 12253:2012 são os seguintes: 4% para a estabilização de solos A1-a e A1-b, 5% para solos A2 e 7% para solos A3 e A4.

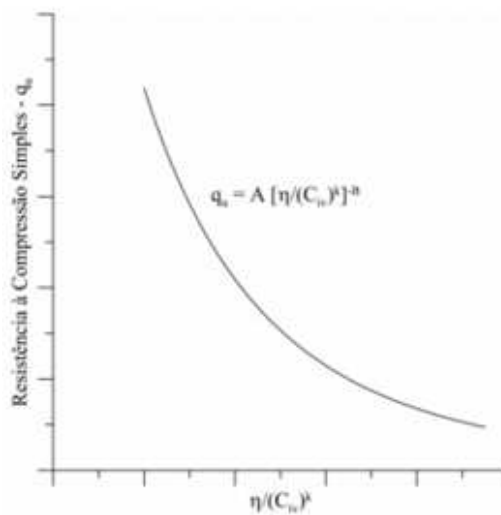
Larnach (1960) foi um dos pioneiros a propor um método racional de dosagem para o solo-cimento. De acordo com sua abordagem, existe uma relação entre a resistência à compressão simples (q_u) e a razão entre o volume absoluto de vazios (V_v) e o volume absoluto de cimento (V_c), conforme demonstrado na Equação 10. Larnach (1960) explicou que o uso dessa relação é de grande utilidade para a dosagem e execução da mistura de solo-cimento, permitindo prever a resistência desejada por meio da avaliação da relação entre os vazios e o agente cimentante.

$$q_u = f\left(\frac{V_v}{V_c}\right) \quad (10)$$

Mais tarde, Foppa (2005) conduziu um estudo sobre a influência da adição de cimento no arenito Botucatu, o que possibilitou estabelecer uma relação entre a resistência do solo melhorado e a razão entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de cimento (C_{iv}), conforme apresentado na Equação 11 e Figura 4.

$$q_u = A \left(\frac{\eta}{C_{iv}^k} \right) \quad (11)$$

Figura 4 - Variação da resistência à compressão simples em função da razão de volumes.



Fonte: Foppa (2005).

O ajuste realizado por meio do expoente "k" combina os efeitos da porosidade e do teor de cimento sobre a variável resposta. Se o efeito da porosidade for mais significativo do que o do teor de cimento, o valor do expoente "k" será inferior a 1,0. Por outro lado, se o

efeito do teor de cimento for maior, o expoente "k" será superior a 1,0. Quando os efeitos de ambos os parâmetros são equivalentes, o expoente "k" é igual a zero.

De forma mais ampla, a Equação 12 incorpora o expoente de ajuste polinomial "B" à Equação 11. Diambra et al. (2017) demonstraram que os valores de "k" e "B" dependem principalmente das características do solo, sendo que o valor de "B" pode ser aproximado ao inverso de "k". A magnitude do escalar "A" é influenciada por propriedades tanto do solo quanto da matriz cimentícia. Portanto, o valor de "A" é altamente influenciado pelos tempos e temperaturas de cura, uma vez que esses fatores afetam a dinâmica de hidratação do cimento e, conseqüentemente, a formação dos compostos hidratados.

$$q_u = A \left(\frac{\eta}{C_{iv}^k} \right)^{-B} \quad (12)$$

Estudos posteriores evidenciaram que a razão $\frac{\eta}{C_{iv}^k}$ pode ser relacionada com outros parâmetros de comportamento de materiais artificialmente cimentados, além da resistência mecânica. Por exemplo, com a rigidez inicial (Consoli et al., 2017a) e a durabilidade em termos de perda de massa acumulada (Consoli e Tomasi, 2018a).

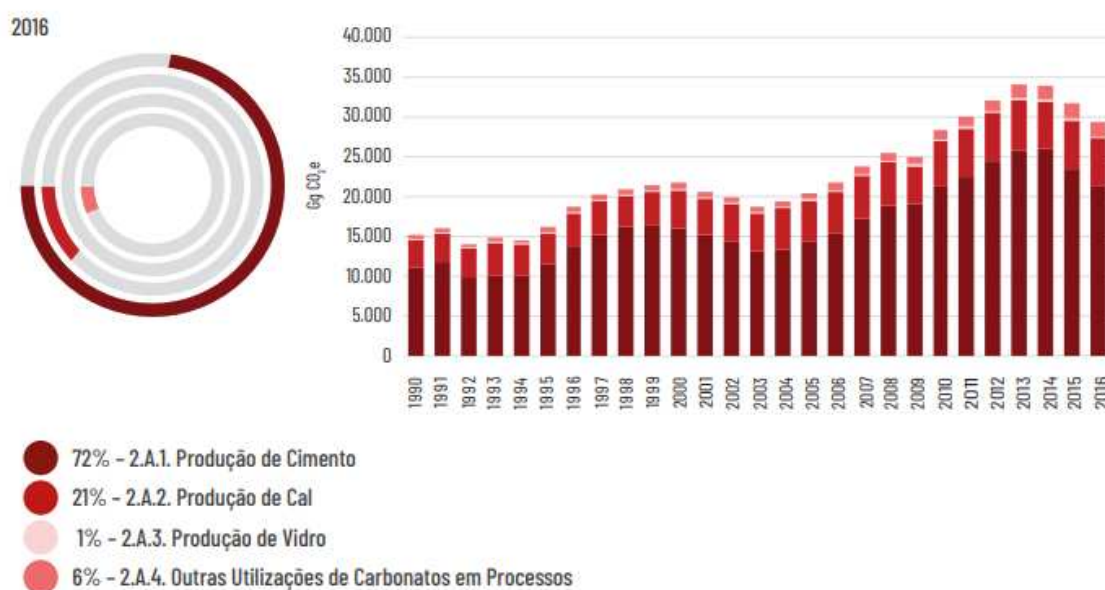
A adição de cimento Portland apresenta diversas melhorias no comportamento da mistura, contribuindo para o aumento da resistência, da capacidade de suporte, da durabilidade, do peso específico seco e da rigidez da mistura. Além disso, permite controlar a expansão, reduzir a plasticidade e modificar a textura do solo, conforme indicado por Dornelles (2020), Kézdi (1979), Consoli et al. (2017b) e Consoli et al. (2018).

Por outro lado, Maury e Blumenschein (2012) ressaltaram que a cadeia produtiva de cimento acarreta impactos ambientais e sociais significativos. Esses impactos afetam diretamente às comunidades próximas às instalações fabris e podem resultar na degradação do meio ambiente e emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), que se manifestam em formas prejudiciais à saúde humana, incluindo poluição do ar, da água e do solo.

De acordo com o último Inventário de Gases do Efeito Estufa, 202, a produção de cimento é responsável por cerca de 7% das emissões totais de Gases de Efeito Estufa (GEE) causadas pelo homem. No contexto brasileiro, essa contribuição chega a quase um terço da média mundial, representando 2,3% das emissões.

O Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa de 2021, retratado na Figura 5, ilustra as emissões de CO₂ no Brasil no período de 1990 a 2016, focando no subsetor da Indústria Mineral nacional. A figura revela a variação temporal das emissões relacionadas aos processos de produção de cimento, cal, vidro e outras aplicações de carbonatos e processados. Notavelmente, a produção de cimento destaca-se como principal contribuinte, representando 72% das emissões totais.

Figura 5 - Emissão de CO₂ da Indústria Mineral.



Fonte: Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa, 2021.

Como substitutos ao cimento Portland, materiais como cal, cinzas e betume têm sido tradicionalmente empregados para promover a cimentação no solo. Uma tendência crescente, impulsionada por preocupações com a sustentabilidade, é a pesquisa e utilização de agentes cimentantes derivados de resíduos, exemplificado pela produção de cal a partir de cascas de ovos.

2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL COMERCIAL

A cal hidratada é o tipo de cal mais empregado na estabilização de solos. De acordo com as normas NBR 7175:2023 e NBR 6471:1998, ela é produzida através da hidratação da cal virgem, composta principalmente por uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, uma combinação de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido

de magnésio. Recomenda-se que as cales hidratadas contenham um teor elevado de cálcio e menos de 5% de óxido de magnésio ou hidróxido de magnésio. Por outro lado, cales dolomíticas, contendo de 35 a 46% de óxido ou hidróxido de magnésio, podem ser utilizadas, mas sua reação é mais lenta em comparação com as cales calcíticas (National Lime Association, 2004; ASTM C977, 2018). Conforme estipulado na NBR 7175:2023, as cales hidratadas (CH-I, CH-II e CH-III) devem satisfazer os requisitos químicos e físicos especificados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1- Exigências químicas.

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO ₂)	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO+MgO)		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais na base de não-voláteis (CaO _t + MgO _t)		≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%

Fonte: NBR 7175 (2023).

Tabela 2 - Exigências físicas.

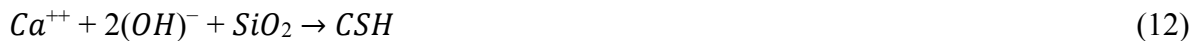
Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600 mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Peneira 0,075 mm	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Retenção de água		≥ 75%	≥ 75%	≥ 70%
Incorporação de areia		≥ 3,0	≥ 2,5	≥ 2,2
Estabilidade		Ausência de cavidade ou protuberâncias		
Plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110

Fonte: NBR 7175 (2023).

Ao adicionar cal a um solo, a melhoria resultante é produto de reações químicas que ocorrem em duas etapas distintas, conforme descrito por Castro (1995) e Thomé (1994). A etapa inicial é caracterizada por reações rápidas, que duram horas a dias, e envolvem processos como troca catiônica, floculação, compressão da dupla camada elétrica e adsorção de cal. Por outro lado, a etapa subsequente é mais lenta e pode se estender por meses a anos, abrangendo as reações pozolânicas e de carbonatação.

As Equações 10 a 13 representam as reações químicas entre o solo e a cal, conforme proposto por Bergado et al. (1996). A Equação 10 descreve a hidratação da cal viva, resultando na formação de cal hidratada e na liberação de calor, enquanto a Equação 13

descreve as reações pozolânicas responsáveis pela formação de CSH (hidrato de silicato de cálcio) e CAH (hidrato de aluminato de cálcio).

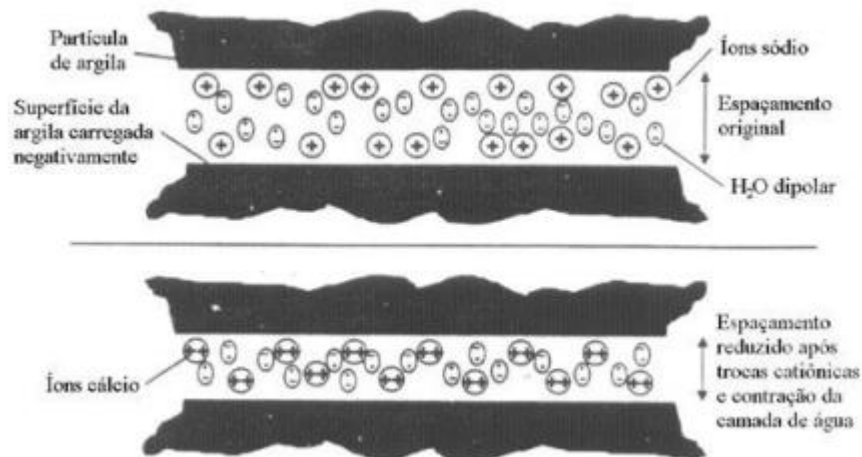


Thomé (1994) explica que a floculação proporciona uma maior estabilidade estrutural às partículas argilosas. De acordo com Prusinski e Bhattacharja (1999), as trocas catiônicas iniciam com a atração de cátions e moléculas dissolvidos na água em direção às superfícies dos argilominerais, que possuem uma carga negativa. A ordem de adsorção preferencial dos cátions, conforme Herrin e Mitchel (1961), segue a seguinte sequência na série liotrópica: $Li^+ < Na^+ < H^+ < K^+ < NH_4^+ \ll Mg^{++} < Ca^{++} \ll Al^{+++}$. Em termos gerais, os cátions de menor valência são substituídos por cátions de maior valência; íons com alta concentração substituem os de baixa concentração; e cátions maiores substituem os menores.

A Figura 6 ilustra o processo de troca catiônica, que é responsável pela estabilização da dupla camada, pelo aumento do atrito interno entre as partículas aglomeradas e pela modificação da estrutura do solo, conforme explicado por Prusinski e Bhattacharja (1994).

A adsorção química das moléculas de cal ocorre quando íons de cálcio são liberados na mistura. De acordo com Rogers e Glendinning (2000), os íons hidroxila de cálcio liberados elevam o pH da solução a um valor suficientemente alto, facilitando a dissolução da sílica, da alumina e do ferro presentes no solo. Com o passar do tempo, o cálcio liberado reage com a sílica, a alumina e o ferro, resultando na formação de produtos cimentantes do tipo silicatos (CSH) e aluminatos hidratados (CAH) de cálcio. Esses produtos são responsáveis pelo contínuo aumento da resistência mecânica das misturas de solo-cal (Thomé, 1994; Johann, 2013).

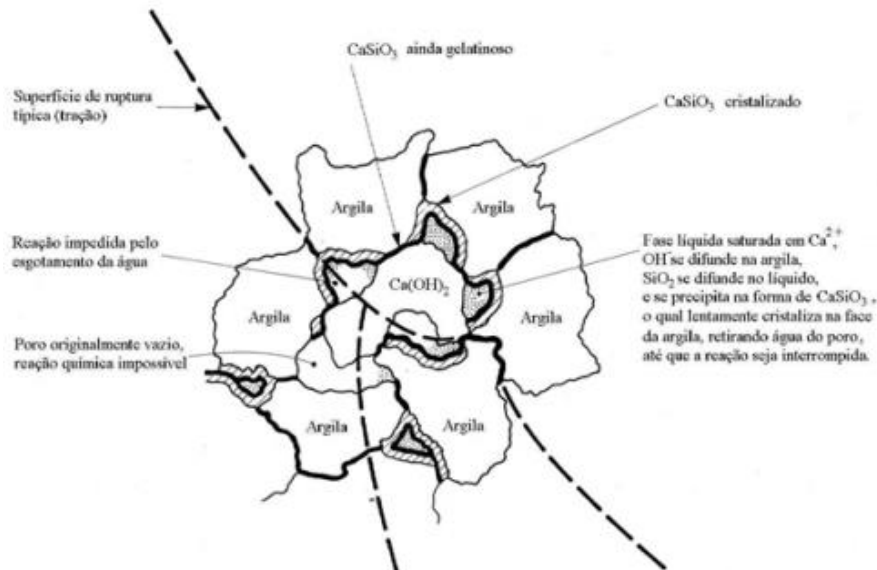
Figura 6 - Processo de troca catiônica.



Fonte: Prusinski e Bhattacharja (1994).

Ingles e Metcalf (1972) explicaram que os géis de silicato cobrem e ligam as partículas de argila, preenchendo os vazios (Figura 7).

Figura 7 - Estabilização de solo-cal.



Fonte: Ingles e Metcalf (1972).

A carbonatação (Equação 14) é a reação que ocorre quando a cal entra em contato com o dióxido de carbono presente no ar atmosférico, e é responsável pela formação de cristais de CaCO₃ (Thomé, 1994).



Solos estabilizados com cal foram objeto de diversos estudos realizados por pesquisadores como Nuñez (1991), Thomé (1994), Lopes Junior (2011) e Johann (2013). Essas investigações demonstraram que, ao contrário do cimento, as reações pozolânicas da cal viva requerem a presença de sílica e alumina em estado amorfo. Como resultado, qualquer solo que contenha argila pode ser estabilizado com cal. Quando o Índice de Plasticidade (IP) de um solo for igual ou superior a 10%, a estabilização com cal pode ser considerada mais econômica do que a estabilização com cimento.

Solos pertencentes aos grupos A-5, A-6, A-7 e alguns A-2-6 e A-2-7, de acordo com o sistema de classificação da AASHTO, são suscetíveis à estabilização e melhoria com cal. De maneira semelhante, solos classificados como CH, CL, MH, ML, CL-ML, SC, SM, SW-SC, SP-SC, SM-SC, GP-GC e GM-GC pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos podem ser considerados potencialmente estabilizáveis com cal. Não apenas os argilominerais, mas também o quartzo, a mica e outros minerais primários reagem e produzem produtos cimentantes.

A Tabela 3 apresentada por Ingles e Metcalf (1972) fornece os teores de cal necessários para o melhoramento e estabilização de diferentes tipos de solos.

Tabela 3- Teores de cal para melhoramento e estabilização dos solos.

Tipo de solo	Teor de cal para melhoramento (%)	Teor de cal para estabilização (%)
Pedra finamente britada	2 a 4	Não recomendado
Pedregulho argiloso bem graduado	1 a 3	≥ 3
Areias	Não recomendado	Não recomendado
Argila arenosa	Não recomendado	≥ 5
Argila siltosa	1 a 3	2 a 4
Argilas	1 a 3	3 a 8
Solos orgânicos	Não recomendado	Não recomendado

Fonte: Ingles e Metcalf (1972).

Thompson (1975) recomenda a adição de cal em solos que contenham mais de 10% de partículas com diâmetro inferior a 2 micros. Robbnet e Thompson (1969) sugerem a adição de cal em solos com mais de 7% de partículas com diâmetro inferior a 2 microns e Índice de Plasticidade (IP) maior ou igual a 8%. Por outro lado, Little et al. (1987) recomendam o uso de cal em solos arenosos ou siltosos com mais de 7% de partículas com diâmetro inferior a 2 microns e IP maior ou igual a 10%.

No que diz respeito aos métodos de dosagem, Eades e Grim (1966) propõem o "método do pH" para determinar a quantidade mínima de cal necessária para a estabilização de um solo. Esse método envolve a adição de cal ao solo em quantidade suficiente para alcançar um pH de 12,4, que é necessário para desencadear trocas catiônicas e outras reações iniciais. Thompson (1966) considera um solo como reativo à cal quando a adição de cal resulta em um aumento na resistência à compressão simples de pelo menos 345 kPa após 28 dias de cura a 22,8°C. Solos não reativos podem não melhorar a resistência e durabilidade, mas ainda podem afetar positivamente o Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR), expansão e plasticidade da mistura. Vale a pena mencionar os métodos "Initial Consumption of Lime" (ICL) e "Lime Fixation Point" (LFP) propostos por Rogers et al. (1997) e Hilt e Davidson (1960), respectivamente.

Estudos mais recentes conduzidos por Consoli et al. (2009a, 2009b) propuseram uma relação semelhante à Equação 11, na qual o teor volumétrico de cimento é substituído pelo teor volumétrico de cal (L_{iv}) para solos finos estabilizados com cal. Essa expressão estabelece uma relação entre a resistência do solo estabilizado com cal e a razão η/L_{iv}^k . De maneira similar, Consoli et al. (2018a, 2018b) relacionaram a resistência do solo estabilizado com a razão η/B_{iv}^k , com o objetivo de expressar em uma única relação os efeitos combinados da porosidade, do teor de pozolana e do teor de cal no comportamento mecânico de solos artificialmente cimentados. O índice corresponde à relação entre a porosidade e o teor volumétrico de ligante, sendo o ligante a soma do teor volumétrico de pozolana e cal, ajustado pelo expoente k.

Dornelles (2020) explica que essa relação entre porosidade e teor de ligante foi aplicada principalmente a solos com fração argilosa menor que 5,0%. Isso ocorre porque solos dessa natureza são considerados pouco reativos, uma vez que não possuem uma parcela significativa de argilominerais em sua composição. Em solos argilosos com a adição de pozolana e cal, podem ocorrer reações entre a cal e os argilominerais presentes no solo, o que pode tornar o uso do índice η/B_{iv}^k inadequado.

Em resumo, estudos anteriores demonstram que a adição de cal tende a produzir os seguintes efeitos em solos estabilizados: modificação dos limites de Atterberg, redução do potencial de retração e do peso específico seco máximo, aumento da resistência à compressão simples, resistência à compressão diametral, CBR, durabilidade, rigidez, coesão e umidade ótima.

2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL DE CASCAS DE OVO

A Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2023) reportou a produção de 52,1 bilhões de ovos de galinha em 2022 no Brasil, com 0,44% destinados à exportação e o restante consumido no país. As Figuras 8a e 8b ilustram, respectivamente, a produção de ovos no Brasil no período de 2012 a 2022 e a destino da produção brasileira de ovos em 2022.



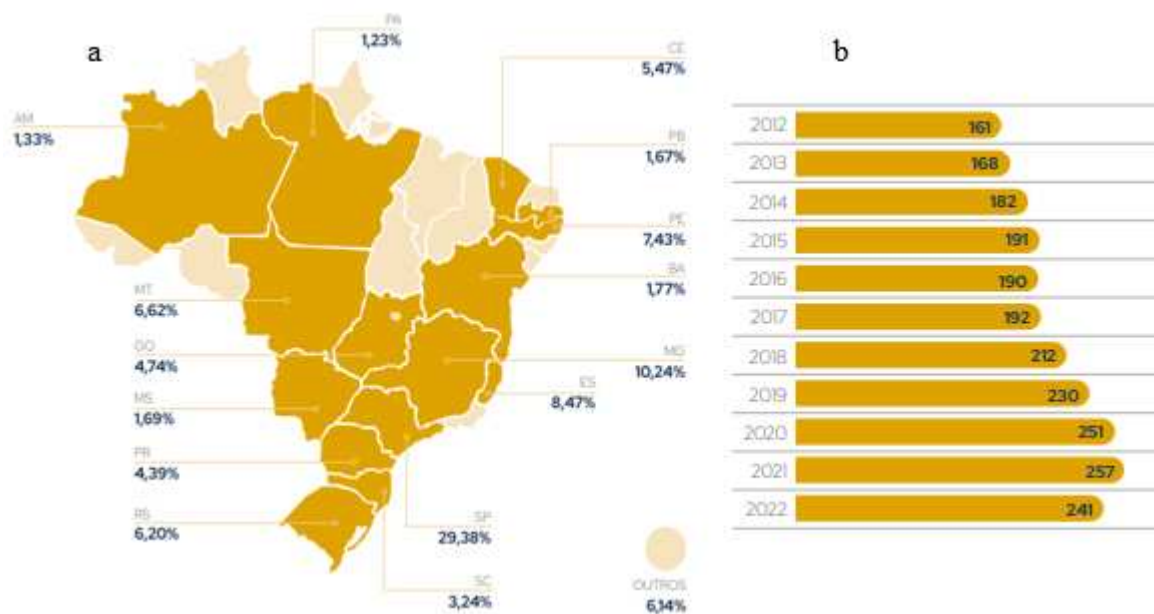
Fonte: ABPA (2023).

As Figuras 9a e 9b representam o alojamento de pintainhas por unidade federativa em 2022 e a tendência do consumo per capita de ovos (unidades/habitante). É notável que 3,24% das pintainhas estão localizadas no Estado de Santa Catarina em 2022.

O volume de casca de ovo gerado no Brasil pode ser facilmente estimado com base na informação fornecida por Almeida et al. (2019), que relataram a geração média de aproximadamente 5,13 gramas de casca por ovo consumido. Paralelamente, Francis e Rahma (2016) citaram diversos estudos que abordaram a quantidade de resíduos de cascas de ovo gerados nos Estados Unidos, Egito e União Europeia, bem como as preocupações de algumas organizações em relação à necessidade de regulamentações para um descarte mais sustentável das cascas de ovo. Castanheda e Stechina (2013) destacaram que, geralmente, as cascas de ovos são descartadas diretamente em aterros sanitários, sem passar por qualquer tratamento prévio. Conseqüentemente, ao longo do tempo, esses resíduos sofrem biodegradação, resultando em odores desagradáveis, proliferação de pragas e crescimento de microrganismos,

o que não apenas afeta negativamente o local de descarte, mas também representa riscos para a saúde pública e o meio ambiente.

Figura 9 - a) evolução da produção de ovos no Brasil e b) destino da produção brasileira de ovos em 2022.



Fonte: ABPA (2023).

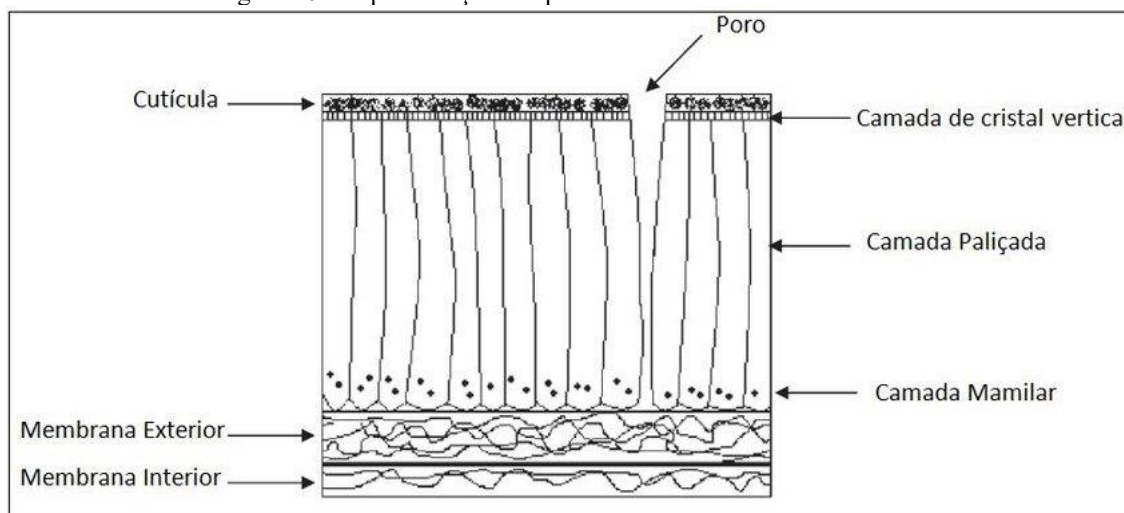
Com o intuito de minimizar os impactos ambientais e encontrar uma destinação adequada para o significativo volume de resíduos de cascas de ovos, diversos estudos têm explorado o processo de beneficiamento e a aplicação desses resíduos para a estabilização do solo (Okonkwo, Odiong e Akpabio, 2012). Essas pesquisas buscam alternativas para a substituição parcial ou total do cimento Portland ou da cal comercial devido aos custos associados, às emissões de Gases de Efeito Estufa, à alta demanda energética e ao consumo de recursos naturais relacionados a esses agentes cimentantes convencionais.

Segundo Fernandez e Arias (2000), a casca de ovo é composta por diferentes elementos, incluindo a membrana (interna e externa), a camada mamilar, a camada paliçada e a cutícula, como ilustrado na Figura 10. Esses componentes são depositados de maneira organizada em camadas concêntricas.

A membrana constitui a parte mais interna da casca de ovo e atua como uma interface entre o conteúdo interno do ovo e o restante da casca. Apresenta uma estrutura fibrilar e amorfa, com composição química distinta em relação às outras partes da casca. A camada mamilar é uma estrutura fina e corresponde a menos de um terço da espessura total da casca. Por sua vez, a camada paliçada é a camada mais espessa da casca de ovo, composta por

componentes tanto orgânicos quanto inorgânicos. A fração inorgânica é predominante em carbonato de cálcio, enquanto a fração orgânica é composta por proteínas. Por fim, a cutícula representa a camada mais externa da casca de ovo e é responsável pela coloração visível da casca. Nessa camada, encontram-se glicoproteínas e pigmentos que determinam a coloração da casca (Fernandez e Arias, 2000).

Figura 10 - Representação das partes constituintes da casca de ovo.



Fonte: Vieira et al. (2017).

Neves (1998), Winton (2003) e Hassan (2009) analisaram a composição química da casca de ovo. Os resultados indicaram que a casca de ovo é predominantemente composta por matéria inorgânica, incluindo carbonato de cálcio, carbonato de magnésio, fosfato de cálcio e outros componentes inorgânicos. A ordem de grandeza dos resultados obtidos por esses estudos segue a mesma tendência, revelando a homogeneidade na composição.

Tabela 4 - Composição química de casca de ovo.

Composição química	Autores		
	Neves (1998)	Winton (2003)	Hassan (2009)
	Peso da casca (%)		
Carbonato de cálcio (CaCO ₃)	96	93,7	94
Carbonato de magnésio (MgCO ₃)	1	1,30	1
Fosfato de cálcio Ca ₃ (PO ₄) ₂	1	0,8	1
Matéria orgânica	2	4,2	4

Fonte: adaptado pelo autor, 2023.

Diversos pesquisadores, através análise química, por meio de um ensaio de Difractometria de Raio X (DRX), o qual identifica a presença a presença da composição química por meio do teor de óxido, puderam identificar a composição da casca de ovo crua. Entre os estudiosos, destaca-se Yerramala (2014), Balamurugan e Santhosh (2017), Yu et al. (2017), Fazzera et al. (2017) e Ferraz et al. (2018) Kannam Naidu et al. (2018). Para uma análise adequada na composição química, a casca de ovo passa por alguns processos. Inicie-se pela limpeza, para que seja eliminada a impureza e também a fina membrana da casca, é de consenso entre os pesquisadores que a limpeza mais eficiente se da por meio de água corrente

Após a lavagem, tem-se a secagem. Este processo pode variar de acordo com as pesquisas. Pode ser simplesmente deixando a casca de ovo secando ao ar, exposta ao sol por um período de um a cinco dias, (Doh and Chin, 2014; Yerramala, 2014). Outra forma é , utilizando um forno, em temperaturas próximas a 110 °C, por 12 h, ambos métodos geram o mesmo efeito (Kiew et al., 2016).

Por fim, para todas as pesquisas analisadas, a casca de ovo é triturada e peneirada em uma peneira de tamanho 90 µm. Com base em todo o processo, a Tabela 5, apresenta os resultados da análise de DRX da casca de ovo após o processo segundo diversos autores. Nesta, é possível observar consonância entre as pesquisas.

Tabela 5 - Resultado DRX para a casca de ovo após o processo de secagem.

Teores de Óxido	Autores					
	Kannam Naidu et al. (2018)	Yerramala (2014)	Balamurugan e Santhosh (2017)	Yu et al. (2017)	Fazeera et al. (2017)	Ferraz et al. (2018)
Porcentagem (%)						
CaO	50,7	52,15	47,49	52,10	53,6	53,51
Na ₂ O	0,19	-	0,14	0,15	0,01	0,12
Cl	0,219	0,011	-	-	-	-
SiO ₂	0,09	1,22	-	0,58	0,08	0,02
MgO	0,01	0,60	-	0,06	0,01	0,66
Al ₂ O ₃	0,03	0,28	0,11	0,06	0,04	0,01
P ₂ O ₅	0,24	-	-	-	-	0,30
SO ₃	0,57	-	0,38	0,62	0,61	0,55
K ₂ O	0,57	-	-	0,25	-	0,03
Fe ₂ O ₃	0,02	0,16	-	0,02	0,02	-
SrO	0,13	-	-	-	-	-
Perda ao fogo	-	-	-	-	-	44,79

Fonte: adaptado pelo autor, 2023.

A calcinação das cascas de ovo em alta temperatura provoca a decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3), resultando na formação de cinzas contendo óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO_2), um processo semelhante ao que ocorre na produção de cal virgem (cal viva), de acordo com Júnior e Nienov (2022).

Hassan (2009), Bensaifi et al. (2019) e Consoli (2020) conduziram estudos sobre a composição química das cinzas obtidas a partir da queima de cascas de ovo em temperaturas de 500°C , 1000°C e 900°C , respectivamente. Os resultados detalhados dessas análises estão apresentados na Tabela 6.

Acosta (2021) descreve o processo de hidratação da cal viva, que envolve a adição de aproximadamente o dobro da quantidade estequiométrica necessária de água, com o objetivo de controlar a temperatura gerada durante a reação. Essa adição de água pode ser realizada por aspersão, imersão ou fusão. A aspersão envolve espalhar blocos de cal viva sobre uma superfície e adicionar água, representando de 25% a 50% do peso total da cal. A imersão consiste em submergir fragmentos de cal viva colocados em cestos em água por um minuto. Por fim, a fusão envolve inserir fragmentos de blocos de cal em recipientes ou tanques cheios de água, resultando na formação de uma pasta de cal.

Tabela 6 - Composição química de cinza de casca de ovo.

	Hassan (2009)	Consoli (2020)	Bensaifi et al. (2019)
Temperatura de incineração	500°C	1000°C	900°C
Tempo de incineração	-	1h	2h
Teores de Óxido		Porcentagem (%)	
CaO	50,7	93,71	92,02
SiO ₂	0,09	0,12	0,41
Al ₂ O ₃	0,03	0,13	0,11
Fe ₂ O ₃	0,02	0,15	0,02
MgO	0,01	2,36	1,21
Na ₂ O	0,19	-	0,22
SrO	0,13	-	-
NiO	0,001	-	-
P ₂ O ₅	0,24	-	-
SO ₃	0,57	-	-
Cl	0,08	-	0,12
Perda na incineração		3,50	5,22

Fonte: Autor, 2023.

A Tabela 7 exhibe os resultados da composição química da cal hidratada obtida a partir da casca de ovo, conforme os estudos de Beck et al. (2010), Ferraz et al. (2018) e Consoli (2020).

Tabela 7 - Composição química de cal de casca de ovo hidratada.

Teores de Óxidos	Consoli (2020)	Beck et al. (2010)	Ferraz et al. (2018)
	Porcentagem (%)		
CaO	72,90	72,33	76,77
SiO ₂	0,31	-	0,07
Al ₂ O ₃	0,36	-	0,02
Fe ₂ O ₃	0,13	-	-
MgO	1,17	0,84	0,86
Na ₂ O	-	0,16	0,10
SrO	-	-	-
NiO	-	-	-
P ₂ O ₅	-	0,23	0,33
SO ₃	-	-	0,18
Cl	-	-	-
Perda na incineração	25,14	24,22	21,65

Fonte: Autor, 2023.

No que diz respeito às aplicações das cascas de ovo, pesquisas recentes, como a de Gomez (2019), têm se concentrado na utilização da casca de ovo como um substituto parcial do material cimentante em argamassa hidráulica de cimento. Al-SAFY R. (2015) substituiu o cimento Portland por até 5% de cal de casca de ovo e não observou influência nas resistências de compressão e flexão com a adição de cal. Hassan (2014) realizou estudos sobre o desempenho da casca de ovo no concreto, utilizando proporções de 0%, 5%, 10% e 15% em concreto, juntamente com cimento Portland, agregado graúdo, agregado miúdo e água.

Beraldo e Nagumo (2004) conduziram experimentos com cascas de ovo submetidas a três métodos diferentes de limpeza para avaliar suas influências na resistência à compressão simples. O primeiro método de limpeza envolveu a lavagem das cascas em água pura, seguida de secagem em estufa a 105 °C por 24 horas. O segundo método consistiu no tratamento das cascas em uma solução contendo 3% de NaOH por 24 horas, seguido de lavagem em água corrente e secagem em estufa a 105 °C por 24 horas. O terceiro método incluiu o tratamento das cascas em uma solução contendo 5% de Ca(OH)₂ por 24 horas, seguido de lavagem em água corrente e secagem em estufa por 24 horas. Os resultados indicaram que a mistura com

as cascas de ovo submetidas ao primeiro método de lavagem apresentou maior resistência à compressão simples em comparação às outras amostras.

Em um estudo realizado por Okonkwo, Odiong e Akpabio (2012), foi analisada a resistência à compressão simples de uma mistura composta por solo laterítico, pó de casca de ovo incinerado a 500°C e cimento Portland comum. O cimento foi adicionado em duas proporções, 6% e 8%, enquanto o pó de casca de ovo foi incorporado em quantidades variando de 2% a 10% em relação à massa seca do solo. Os resultados deste estudo revelaram que o aumento na quantidade de cinza de casca de ovo na mistura resultou em um ganho médio de resistência à compressão simples de aproximadamente 35%. Além disso, observou-se que o aumento do teor de resíduo de casca de ovo também contribuiu para melhorias no CBR.

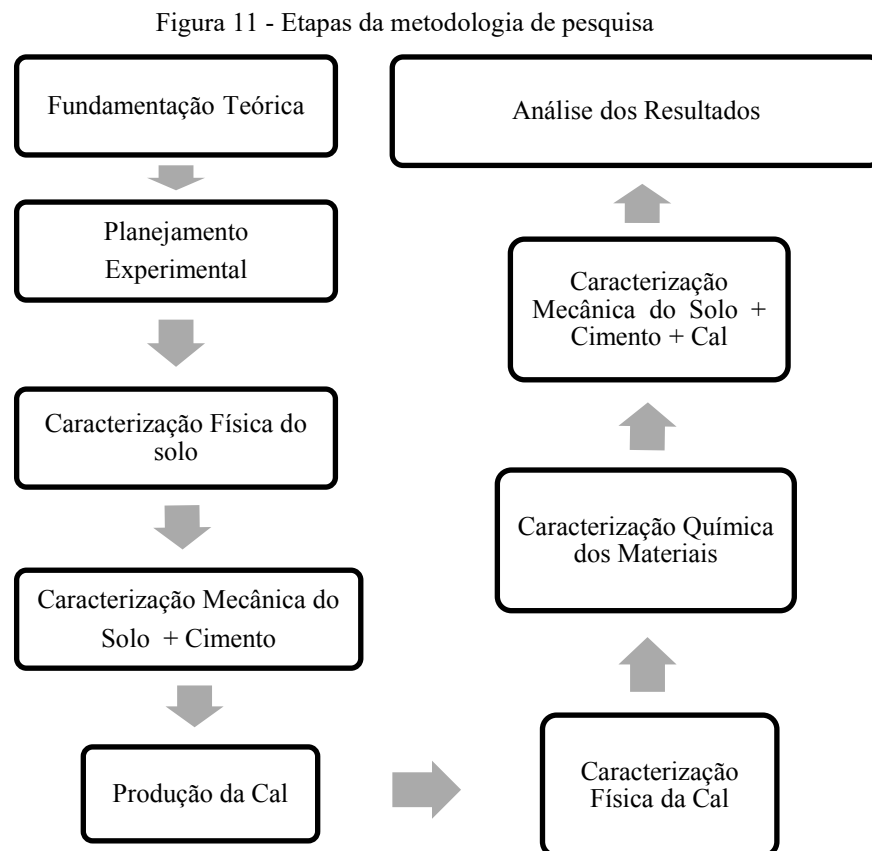
A pesquisa de Azevêdo (2010) destaca melhorias significativas na capacidade de suporte de um solo quando é adicionada cal virgem. Mtallib e Rabiou (2009) explicam que a cal atua como um catalisador quando adicionada a uma mistura de solo-cimento, acelerando o ganho de resistência. Paixão (2022) conduziu um estudo em que desenvolveu um ligante álcali-ativado (LAA) utilizando cinza de casca de arroz (CCA) e cal de casca de ovo hidratada (CCOH), avaliando o melhoramento de solo residual de basalto (SRB) compactado. Da mesma forma, Acosta (2021) avaliou a potencial utilização da combinação de resíduos de vidro moído (RVM) e uma cal alternativa obtida a partir da calcinação da casca do ovo para a produção e otimização de um cimento álcali-ativado com soluções de hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3) em termos de resistência à compressão.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho compreende a caracterização física e química dos materiais utilizados, bem como a realização de ensaios mecânicos para a análise da resistência dos solos estabilizados. O presente capítulo descreve o planejamento da pesquisa, incluindo a seleção dos materiais e a determinação de seus teores, além da definição dos tipos e quantidade dos ensaios realizados. Além disso, são apresentados os procedimentos empregados para a produção de cal hidratada a partir de cascas de ovos, bem como o planejamento das etapas subsequentes deste trabalho.

3.1 ETAPAS DE METODOLOGIA

A Figura 11 apresenta as principais etapas da metodologia do presente trabalho.



Fonte: Autor, 2023.

A primeira fase envolveu a elaboração da fundamentação teórica, concentrando-se nos principais conceitos relacionados à estabilização de solos. A segunda etapa focou-se no planejamento da pesquisa, definindo os materiais a serem utilizados, os tipos e teores dos agentes cimentantes, o tempo de cura, os tipos e quantidade de ensaios, as sequências de execução, entre outros aspectos. Dado a diversidade dos materiais empregados, as caracterizações físicas, químicas e mecânicas foram realizadas em diferentes momentos, à medida que a pesquisa avança. Por fim, as etapas de análise e interpretação dos resultados foram conduzidas conforme os ensaios eram realizados.

3.2 DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS E DOS TIPOS DE ENSAIOS

A investigação do comportamento de solo estabilizado envolve a utilização de um solo granular, juntamente com três tipos de agentes cimentantes: Cimento Portland (CP), Cal Hidratada Comercial (CHC) e Cal de Casca de Ovo (CCO). No processo de produção da cal de casca de ovo, foram definidas duas temperaturas de calcinação 900° C e 1000°C, sendo representadas neste trabalho por CCO – I e CCO – II, respectivamente. A escolha das temperaturas baseou-se na capacidade máxima suportada pelo forno mufla utilizado. Foram estabelecidos três teores de cimento (3%, 5% e 7%) e dois tempos de cura dos corpos-de-prova (7 dias e 28 dias), seguindo os procedimentos adotados em estudos anteriores. A determinação dos pesos específicos secos para a moldagem dos corpos-de-prova foi feita a partir dos resultados dos ensaios de compactação, enquanto os teores de cal (1%, 3%;5%) foram determinados com base nos ensaios de pH. A Tabela 8 resume as principais variáveis do estudo e seus respectivos níveis.

Tabela 8 - Variáveis da pesquisa e os seus níveis.

Variável	Níveis
Agente cimentante	CP, CHC, CCO – I e CCO - II
Temperatura da calcinação – CCO (°C)	900 °C e 1000 °C
Peso específico seco (γ_d)	14 kN/m ³ , 15 kN/m ³ . e 16 kN/m ³
Teores de cimento (%)	0%,3%; 5%; 7%
Teores de cal (%)	1%; 3%; 5%
Tempo de cura (dias)	7 e 28 dias

Fonte: autor, 2023.

A Tabela 9 apresenta os principais ensaios físicos, mecânicos e químicos realizados neste trabalho. Para a caracterização física dos materiais, foram realizados os ensaios de granulometria por peneiramento e a laser, bem como os ensaios da massa específica seca e de compactação Proctor. Os ensaios de Difração de Raios-X, Fluorescência de Raios-X e pH foram realizados para a determinação das propriedades químicas dos materiais. Por fim, os ensaios de compressão simples e compressão diametral foram realizados para investigar o comportamento mecânico das misturas e do solo natural.

Tabela 9 - Caracterização das variáveis.

		Caracterização Física				Caracterização Química		Caracterização Mecânica	
		E1	E2	E3	E4	E5	E7	E8	E9
Solo arenoso		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Agente cimentante	Cal de casca de ovo (CCO)	X	✓	X	X	✓	✓	X	X
	Cal hidratada comercial (CHC)	X	✓	X	X	✓	✓	X-	X
	Cimento Portland (CP)	X	✓	✓	X	✓	✓	X	X
Mistura	Solo + CP	X	X	X	X	X	X	✓	✓
	Solo + CP + CHC	X	X	X	X	X	X	✓	✓
	Solo + CP + CCO	X	X	X	X	X	X	✓	✓

LEGENDA		E1 – Granulometria por peneiramento	E4 – Compactação Proctor	E7 - pH
✓	Realizado	E2 – Granulometria a laser	E5 – Difração de Raios-X	E8 – Compressão Simples
X	Não se aplica	E3 – Massa específica seca	E6 – Fluorescência de Raios-X	E9 – Compressão Diametral

Fonte: Autor, 2023.

3.3 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS E OS MÉTODOS DOS ENSAIOS

Este item descreve os materiais utilizados na pesquisa e apresenta os principais métodos e procedimentos utilizados para a realização dos diferentes tipos de ensaios de laboratório que visam caracterizar os comportamentos físicos, químicos e mecânicos desses materiais.

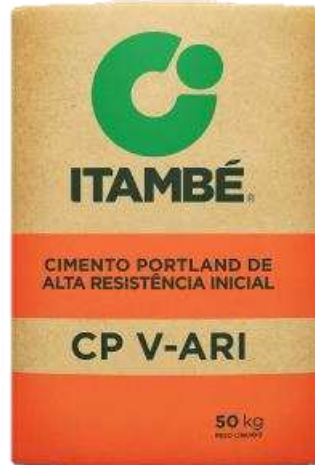
3.3.1 Descrição dos Materiais

A areia em estudo foi coletada nas dunas da Lagoa de Conceição, no Município de Florianópolis/SC. Para remover impurezas, a areia passou por um processo de lavagem e

peneiramento na peneira de 2,0 mm. Em seguida, ela foi seca até alcançar a constância de umidade. Água destilada foi utilizada em todos os ensaios que requerem o uso de água.

O cimento utilizado foi do tipo CP V-ARI da marca Itambé, adquirido em sacos de 50 kg (Figura 12). O CP V-ARI é um cimento Portland de alta resistência inicial, caracterizado por alta reatividade em idades iniciais devido ao grau de moagem a que foi submetido. A massa específica seca do cimento é de 3,12 g/cm³. As Tabelas 10 e 11 apresentam as principais características químicas e físicas do cimento, respectivamente, dentro das faixas estabelecidas na NBR 16697:2018.

Figura 12 - Cimento utilizado na pesquisa.



Fonte: Autor, 2023.

Tabela 10 - Propriedades químicas do cimento CP V – ARI.

	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Perda Fogo (%)	CaO livre (%)
Média	4,35	18,92	2,69	60,59	4,74	2,86	0,94	0,72
Desvio Padrão	0,06	0,22	0,11	0,31	0,32	0,04	0,14	0,05
Mínimo	4,25	18,61	2,57	60,10	4,22	2,76	0,75	0,64
Máximo	4,47	19,24	2,98	61,64	5,35	2,91	1,19	0,80

Tabela 11 - Propriedades físicas e mecânicas do cimento CP V – ARI.

	Tempo de pega		# 200 (%)	# 325 (%)	Resistência à compressão simples			
	Início (h:min)	Fim (h:min)			1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	2 dias (MPa)
Média	02:37	03:14	0,46	3,07	22,4	37,7	43,0	51,2
Desvio Padrão	00:17	00:10	0,08	0,32	0,9	1,0	0,5	0,5
Mínimo	02:24	03:03	0,32	2,45	21,3	36,4	42,1	50,1
Máximo	02:57	03:35	0,61	3,58	23,8	39,4	43,8	52,1

A cal hidratada do tipo CH-III, da marca “CAL CEM”, adquirida em sacos de 20 kg (Figura 13), foi utilizada neste estudo. As características da cal encontram-se dentro das faixas estipuladas na NBR 7175:2023.

Figura 13 - Cal utilizada na pesquisa.



Fonte: Autor, 2023.

A produção de cal a partir de cascas de ovos ocorreu no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC. O processo teve início com a coleta das cascas no restaurante "La Família", localizado nas proximidades do Departamento de Engenharia Civil da UFSC. É importante ressaltar que o restaurante costuma descartar essas cascas como resíduos orgânicos.

As cascas coletadas passaram por uma lavagem minuciosa em água corrente com o objetivo de remover o máximo de resíduos orgânicos e impurezas. Esse processo foi realizado com auxílio de um tubo de PVC com uma tampa perfurada em uma das extremidades, conforme ilustrado na Figura 14a. Após a lavagem, as cascas de ovos úmidas foram dispostas em bandejas e transferidas diretamente para uma estufa (Figura 14b), mantida a uma temperatura constante de 60°C, por um período mínimo de 24 horas até a constância da umidade.

Após a completa secagem, as cascas foram quebradas manualmente para reduzir seu volume antes de serem submetidas ao processo de moagem em um moinho de bolas. Várias tentativas preliminares foram realizadas para determinar o tempo de moagem, a quantidade de bolas e a quantidade de cascas de ovo para o processo de moagem. Ao término de cada tentativa, o material moído foi peneirado em um conjunto de peneiras e a curva granulométrica resultante foi comparada com a de Acosta (2021) tomada como referência. A

Figura 15 apresenta o jarro e as bolas de porcelana utilizados no processo de moagem das cascas de ovo.

Figura 14 - a) Tubo de PVC para a limpeza das cascas de ovo, b) Secagem das cascas em estufa.

a)



b)



Fonte: Autor, 2023.

Figura 15 - Jarro e bolas de porcelanas.



Fonte: Autor, 2023.

A combinação de 4,25 kg de cascas de ovo e um tempo de moagem de 20 minutos proporcionou um material com uma curva granulométrica similar à da Acosta (2021), como mostrada mais adiante. Todo o material moído com tamanho menor que 2,0 mm foi armazenado em galões plásticos devidamente identificados e isolados para evitar variações na

umidade. No total, foram obtidos 34,22 kg de cascas de ovo moídas com tamanho inferior a 2,0 mm. A Figura 16 ilustra o material moído e os galões utilizados para armazená-lo.

Figura 16 - Casca de ovo moída e o processo de armazenamento.



Fonte: Autor, 2023.

Uma vez que as cascas de ovo foram moídas em diferentes dias, foi necessário garantir a completa homogeneização de todo o material. Para isso, todo o material foi misturado até atingir a completa homogeneização e, em seguida, foi dividido em quatro partes iguais (quarteamento). Esse processo não apenas assegurou a uniformidade do material, mas também reduziu a variabilidade inerente ao processo de moagem, garantindo a consistência e a validade dos resultados nos ensaios subsequentes. Após o quarteamento, os materiais foram armazenados em 4 galões, devidamente identificados e vedados. A Figura 17 mostra o processo de mistura e quarteamento dos materiais.

Figura 17 - Processo de mistura e de quarteamento da casca de ovo moída.



Fonte: Autor, 2023.

A calcinação das cascas de ovo foi realizada em dois fornos mufla disponíveis nos laboratórios da UFSC. O forno do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) foi utilizado para incinerar as cascas de ovo à temperatura de 900°C. Já para a temperatura de 1000 °C, a incineração das cascas foi realizada no Laboratório de Energia e Meio Ambiente (LEMA).

Geralmente, cerca de 1,25 kg de material moído foi distribuído em cinco almofarizes de porcelana, que foram então colocados no forno. Nos fornos, o aumento de temperatura foi programado da seguinte forma: inicialmente, a temperatura foi aumentada de forma linear até 100°C abaixo da temperatura alvo máxima, durante um período de 3 horas. Em seguida, houve um aumento linear durante mais 1 hora até a temperatura máxima. A temperatura máxima foi mantida constante por 4 horas para garantir a completa queima do material. Após esse período, a temperatura foi reduzida gradualmente até 150°C durante 2 horas. A Figura 18 mostra o processo de pesagem das cascas de ovo moídas, as cascas dentro do forno para calcinação e a pesagem da cinza (cal virgem) após a queima.

Após a incineração, a obtenção da cal hidratada envolveu a adição de água em quantidade suficiente para cobrir toda a massa da cal virgem (cinza) dentro de um almofariz de porcelana. Para facilitar a reação química e a liberação de calor, a mistura de cal e água foi constantemente agitada por aproximadamente 30 minutos. Em seguida, a mistura foi deixada em repouso por 24 horas antes de ser transferida para uma estufa a uma temperatura de 60°C até que a umidade se mantivesse constante. Após 24 horas na estufa, a cal hidratada foi quebrada dentro de um almofariz de porcelana e moída em um moinho de bolas por 3 horas. Após esse processo, ela foi peneirada em uma peneira de 600 µm. A Figura 19 ilustra a hidratação da cal virgem, a cal hidratada após a moagem e a cal hidratada devidamente identificada e armazenada.

Figura 18 - Pesagem de casca de ovo moída, cascas dentro do forno e a pesagem da cinza.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 19 - Hidratação da cal, cal hidratada após a moagem e cal hidratada identificada e armazenada.



Fonte: Autor, 2023.

3.3.2 Ensaios de Caracterização Física

Os procedimentos adotados para a realização dos ensaios de caracterização física seguiram as normas brasileiras. A NBR 6457/2016 foi utilizada para a preparação das amostras e a determinação do teor de umidade. A NBR 6459/2017 foi empregada para a realização dos ensaios de limite de liquidez (LL), enquanto a NBR 7180/2016 foi seguida para a realização dos ensaios de limite de plasticidade (LP). A NBR 7181/2016 orientou a execução dos ensaios de granulometria, a NBR 6458/2016 foi utilizada para os ensaios de massa específica real dos grãos, e a NBR 7182/2016 foi seguida rigorosamente durante os ensaios de compactação, adotando-se uma energia intermediária com o uso de um cilindro de 2085 cm³ (26 golpes por camada e 5 camadas). Dado que não foram conduzidos ensaios de

compactação para as misturas solo-cimento e solo-cimento-cal, os resultados do ensaio de compactação da areia foram adotados como referência para a moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão simples e compressão diametral, conforme descrito adiante.

Para a classificação dos materiais, a norma ASTM D2487 (2017) foi empregada, enquadrando os materiais nos grupos de classificação definidos pelo Unified Soil Classification System (USCS). Além disso, para complementar a classificação granulométrica das amostras, estas foram analisadas por difração a laser no Laboratório de Aplicações de Nanomateriais em Construções (NANOTEC) da UFSC.

As Figuras 20a e 20b mostram o conjunto de peneiras e o cilindro com soquetes utilizados nos ensaios de peneiramento e de compactação, respectivamente.

Figura 20 - a) conjunto de peneiras e b) cilindro e soquetes do ensaio de compactação.



Fonte: Autor, 2023

3.3.3 Ensaios de Caracterização Química

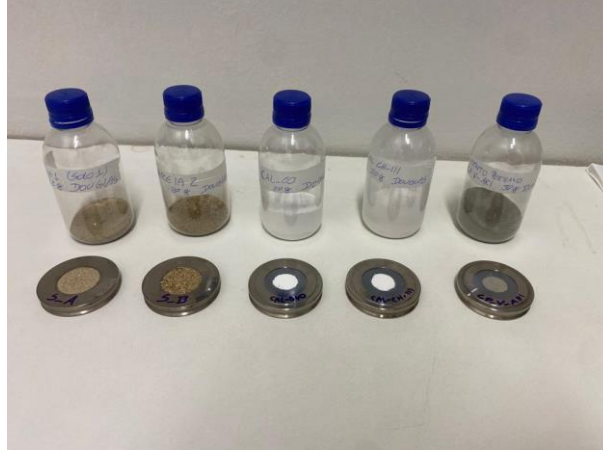
A caracterização química dos materiais engloba as análises de Difração de Raios-X (DRX), e medição de pH das misturas. A técnica de Difração de Raios-X foi empregada para determinar as estruturas cristalinas e amorfas presentes nos materiais estudados. O ensaio de DRX foi realizado no Laboratório Multiusuário de Difração de Raios X (LDRX) da UFSC. A Figura 21 ilustra o Difratômetro de raio X – X`pert MRD utilizado na análise dos materiais, enquanto a Figura 22 apresenta os recipientes utilizados para a preparação e condicionamento das amostras.

Figura 21 - Equipamento DRX.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 22 - Preparação dos materiais para a análise DRX.



Fonte: Autor, 2023.

Para a medição de pH dos materiais (solo arenoso, cimento, cales e misturas) foi utilizado o medidor portátil DM-20P da marca DIGIMED (Figura 23), que possui uma faixa de medição de pH entre -2 a 20. A medição do pH foi conduzida de acordo com a norma ASTM D6276/2019, visando aferir o teor necessário de cal para a estabilização do solo. Com o intuito de quantificar a alcalinidade dos materiais, foram realizadas medições individuais de pH d'água, da cal comercial, da cal de casca de ovo, do cimento Portland e do solo natural. Posteriormente, foram realizadas medições de pH da mistura solo com diferentes teores de cimento e cal.

Figura 23 – Medidor de pH.

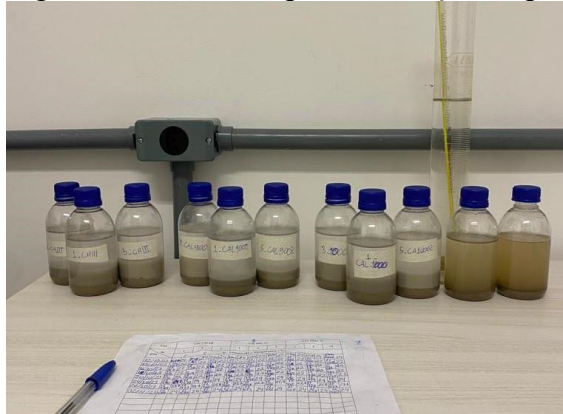


Fonte: Autor, 2023.

Para complementar a análise de pH, foram conduzidas medições ao longo do tempo em misturas de solo-cimento e solo-cimento-cal, visando avaliar a influência do tempo de hidratação no valor de pH.

A preparação de amostras em todas as análises, conforme mencionado anteriormente, seguiu as preconizações normativas. Para agitação, medição e armazenamento, utilizou-se garrafas PET transparentes de 200 ml. Conforme ilustrado na Figura 24, cada garrafa possui uma identificação que indica os tipos de materiais e seus respectivos teores na mistura.

Figura 24 - Materiais para a medição de pH.



Fonte: Autor, 2023.

3.3.4 Ensaios de Caracterização Mecânica

Para a realização dos ensaios de compressão simples e compressão diametral, os corpos-de-prova foram primeiramente compactados com diferentes teores de cimento e/ou cal e peso específico seco (γ_d). Os valores de referência para o peso específico seco e teor de

umidade adotados com base nos valores de $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ e umidade ótima obtidos no ensaio de compactação da areia, que foram de 16,35kN/m³ e 16,80 %, respectivamente.

Os corpos-de-prova das misturas solo-cimento, com tempo de cura de 7 dias, foram moldados com teores de cimento de 0%, 3%, 5% e 7%, e pesos específicos de 14 kN/m³, 15 kN/m³ e 16 kN/m³. Para o tempo de cura de 28 dias, os corpos-de-prova dessas misturas foram moldados com teor de cimento de 5% e peso específico seco de 16 kN/m³.

No caso das misturas solo-cimento-cal, o teor de cimento foi mantido constante em 5%, enquanto os teores de cal foram variados em 1%, 3% e 5%. Os corpos-de-prova foram moldados com peso específico de 16 kN/m³ e submetidos a tempos de cura de 7 e 28 dias.

Para cada combinação, foram compactados três corpos-de-prova (triplicatas), e a compactação foi realizada de forma aleatória, não sequencial, a fim de evitar influências decorrentes das condições ambientais e do operador. A Tabela 12 apresenta um resumo da quantidade de corpos-de-prova moldados para a análise de resistência mecânica.

Tabela 12 - Resumo da atividade laboratorial para análise da resistência mecânica.

Mistura	Ensaio	Tempo de cura	Quantidade (un.)
Solo + Cimento	Compressão Simples (CS)	7 dias	36
	Compressão Diametral (CD)		36
	Compressão Simples (CS)	28 dias	9
	Compressão Diametral (CD)		9
Solo + Cimento + Cal	Compressão Simples (CS)	7 dias	27
	Compressão Diametral (CD)		27
	Compressão Simples (CS)	28 dias	27
	Compressão Diametral (CD)		27
		Total	198

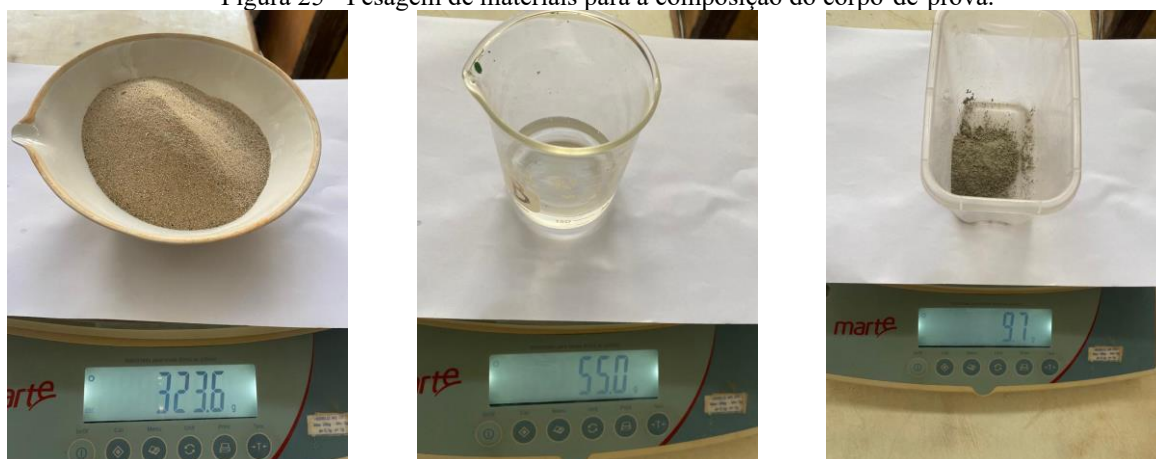
Fonte: Autor, 2023.

Ressalta-se que o processo anterior aos ensaios de compressão simples e compressão diametral envolve as seguintes etapas: i) pesagem e mistura dos materiais, ii) compactação e desmoldagem dos corpos-de-prova, iii) acondicionamento, armazenagem e cura dos corpos-de-prova para permitir reações químicas, cimentação e ganho de resistência ao longo do tempo e iv) submersão dos corpos-de-prova em água para diminuir a sucção no interior dos mesmos.

A seguir, serão detalhados os principais procedimentos adotados na moldagem dos corpos-de-prova, com ênfase na mistura solo-cimento, considerando que os mesmos procedimentos são aplicados na moldagem dos corpos de prova das misturas solo-cimento-cal. A maioria desses procedimentos segue a NBR 12024/2012.

A etapa de compactação começa com a pesagem individual do solo, do agente cimentante (Cimento Portland) e da água, conforme ilustrado na Figura 25. A água destilada foi utilizada na moldagem de todos os corpos-de-prova. De forma organizada, cada mistura recebe uma nomenclatura do tipo "3C_γ14", que indica 3% de cimento e peso específico seco de 14 kN/m³.

Figura 25 - Pesagem de materiais para a composição do corpo-de-prova.



Fonte: Autor, 2023.

Após a pesagem dos materiais em uma balança digital, o passo seguinte envolve a adição do cimento ao solo e a mistura do conjunto até atingir a completa homogeneização, evidenciada pela uniformidade na coloração. Em seguida, a água destilada é adicionada, e o conjunto é misturado novamente até que uma mistura homogênea seja obtida. Este procedimento é essencial para garantir a hidratação uniforme e completa de todas as partículas presentes na mistura de solo e cimento. A quantidade total da mistura é calculada para permitir a moldagem de um único corpo-de-prova e a determinação do teor de umidade. A Figura 26 ilustra o processo de mistura dos materiais.

Logo após a mistura, a massa necessária para compactar cada camada do corpo-de-prova foi pesada e armazenada em um recipiente hermeticamente fechado, com o objetivo de evitar a perda de umidade. Além disso, uma quarta porção da mistura foi separada para a posterior determinação do teor de umidade. A Figura 27 ilustra o processo de pesagem de uma parte do material destinada à compactação, bem como as cápsulas colocadas na estufa para determinar o teor de umidade.

Antes de iniciar a compactação propriamente dita, foi realizada a limpeza e lubrificação com óleo das três partes do molde tripartido e da base. Isso é feito para minimizar

o atrito e a adesão do material compactado à superfície interna do molde. Após a lubrificação, as três partes foram unidas, e um papel filtro foi colocado na base do molde. A Figura 28 ilustra o conjunto do molde tripartido metálico e o pincel utilizado para a sua lubrificação.

Figura 26 - Processo de pesagem e mistura do solo, cimento e água.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 27 - Pesagem do material de uma camada e cápsulas na estufa.



Fonte: Autor, 2023.

Terminada a montagem do molde, o material previamente homogeneizado e armazenado em um dos recipientes foi inserido no interior do molde. Em seguida, o molde foi transportado para a prensa de compactação manual, onde o solo da primeira camada foi compactado estaticamente até alcançar uma espessura de aproximadamente 3,33 cm, atingindo assim a densidade seca alvo desejada. Antes de aplicar o material da segunda camada, a superfície da primeira camada foi suavemente escarificada para promover uma melhor aderência entre as camadas sobrepostas. Esses procedimentos foram repetidos até que

a compactação da terceira camada fosse concluída. A Figura 29 ilustra o material da primeira camada no interior do molde e o equipamento manual de compactação.

Figura 28 - Preparação do molde metálico para o ensaio de compactação.



Fonte: Autor, 2023.

Após a conclusão do processo de compactação, o corpo-de-prova é imediatamente retirado do molde e pesado em uma balança digital com resolução de 0,01 g. Utilizando um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm, são realizadas medições de três diâmetros e três alturas em posições diferentes do corpo-de-prova. A massa, altura média, diâmetro médio e a umidade são utilizados no cálculo dos índices físicos do corpo-de-prova. É importante destacar que o diâmetro médio e a altura média de um corpo-de-prova são aproximadamente iguais a 5 cm e 10 cm, respectivamente. A Figura 30 apresenta um corpo-de-prova compactado e os procedimentos para a medição do diâmetro e da altura.

Figura 29 - Etapas de compactação.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 30 - Medições de um corpo-de-prova após a compactação.



Fonte: Autor, 2023.

Logo após as medições, os corpos-de-prova foram cuidadosamente colocados em sacolas plásticas devidamente identificadas e lacradas para evitar a perda de umidade. As sacolas foram rotuladas da seguinte maneira: “CD_3C_SA_7D_ γ_{d14} _20230621”, levando em consideração o tipo de ensaio (CD – compressão diametral ou CS – compressão simples), teor de agente cimentante (3C – 3% de cimento), tipo de solo (SA – solo arenoso A), tempo de cura (7D – 7 dias), peso específico seco (γ_{d14} – peso específico de 14 kN/m³) e data de moldagem (21/06/2023).

A etapa subsequente envolveu a colocação dos corpos-de-prova em bandejas e seu armazenamento em uma câmara úmida com temperatura controlada, pelo período de seis (ou vinte e sete) dias. Isso foi realizado para facilitar as reações químicas, a cimentação e o ganho de resistência dos corpos-de-prova. Após completarem o sexto (ou vigésimo sétimo) dia na câmara úmida, os corpos-de-prova foram retirados das sacolas e submersos em recipientes com água por um período de 24 horas. A Figura 31 ilustra os passos seguidos no processo de acondicionamento e submersão dos corpos-de-prova.

Figura 31- Acondicionamento e submersão de corpos-de-prova.



Fonte: Autor, 2023.

Após 24 horas de submersão, os corpos-de-prova foram retirados da água, colocados sobre uma mesa para permitir o escoamento da água e, em seguida, foram levemente secos com papel toalha. Antes de iniciar os ensaios de compressão, eles tiveram sua massa medida novamente, e foram registradas as medidas de seu diâmetro e altura para avaliar a influência da submersão.

A realização dos ensaios de compressão simples e os ensaios de compressão diametral visaram medir a força de compressão necessária para romper os corpos-de-prova. No ensaio de compressão simples, os corpos-de-prova são posicionados na vertical e centralizados com a ajuda de um nível de bolha, um top cap e barras de aço posicionadas nas ranhuras das placas. Por outro lado, no ensaio de compressão diametral, os corpos-de-prova são posicionados na horizontal e centralizados com a ajuda dos mesmos acessórios. Esse procedimento garante o carregamento uniforme do corpo-de-prova.

A força aplicada durante os ensaios foi medida com um anel dinamômetro de 5 kN e a velocidade de carregamento é de aproximadamente 1,14 mm/min. A Figura 32 ilustra o processo de secagem dos corpos-de-prova após a submersão e o estado dos corpos de prova após os ensaios de compressão simples e compressão diametral.

Figura 32 - Corpos-de-prova após submersão, ensaio de compressão simples e compressão diametral.



Fonte: Autor, 2023.

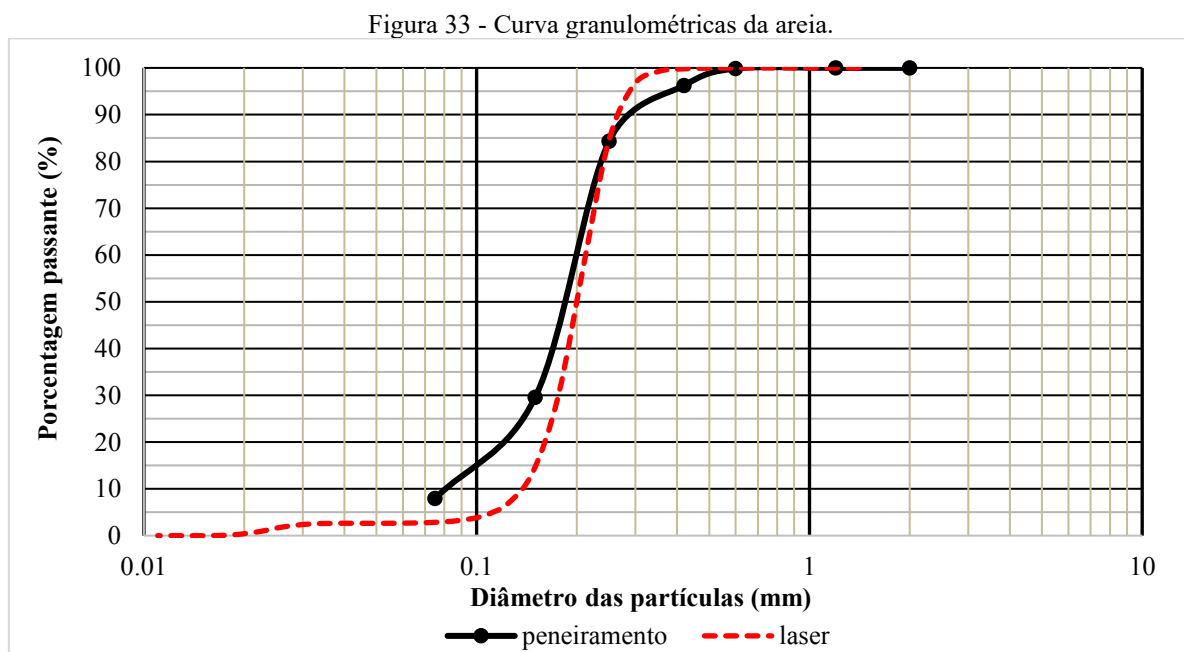
Três critérios foram analisados para aceitar os resultados de um corpo-de-prova. O primeiro critério envolve a verificação do grau de compactação, que é definido como a razão entre o peso específico seco do corpo-de-prova e o peso específico seco alvo. Esse critério é considerado aceitável se o grau de compactação estiver dentro da faixa entre 99% e 101%. O segundo critério avalia o desvio de umidade entre o valor medido e o valor alvo, sendo considerado aceitável um desvio entre -0,5% e 0,5%. Por último, é verificado se o diâmetro médio dos corpos-de-prova está dentro da faixa de $50 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, e se a altura média está dentro da faixa de $100 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os principais resultados de caracterização física, química e mecânica dos materiais estudados.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A Figura 33 compara as curvas granulométricas da areia obtidas por meio de peneiramento e difração a laser. Ambas as curvas apresentam predominância de partículas com tamanhos de areia, o que as classifica como solos uniformes ($C_u < 5$). A areia é composta por mais de 88% de partículas de areia fina e é classificada como areia siltosa mal graduada (SP-SM).



Fonte: Autor, 2023.

A porcentagem de finos é menor que 8% e a areia é classificada como não plástica. Na Tabela 13, é fornecido um resumo dos valores médios das propriedades físicas da areia.

A Figura 34 compara a curva granulométrica da casca de ovo desta pesquisa com a curva de referência de Acosta (2011). Observa-se uma similaridade na distribuição granulométrica entre ambas as curvas. O tamanho das partículas de casca de ovo varia de 0,075 mm a 2 mm, sendo que 78,54% das partículas estão na faixa de 0,42 mm a 2,00 mm. Essa distribuição granulométrica é considerada adequada, uma vez que a literatura indica que

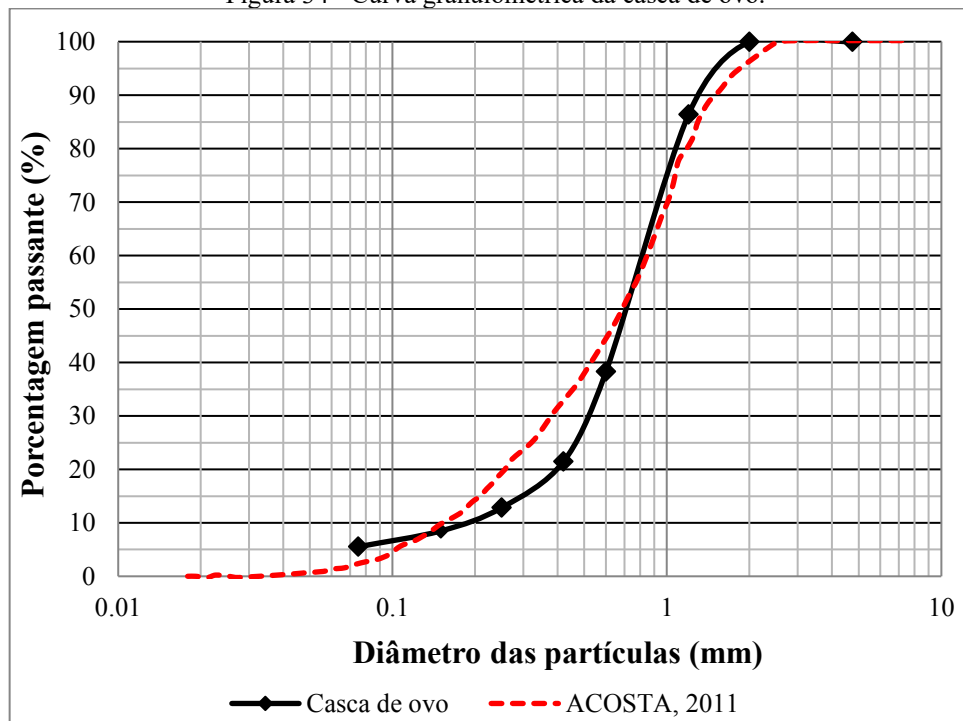
o processo de calcinação da casca de ovo apresenta maior eficiência quando aplicado a fragmentos menores.

Tabela 13 - Propriedades físicas das Areias A e B.

Propriedades	Areia	Norma de Ensaio
Limite de Liquidez	-	NBR 6459/2016
Limite de Plasticidade	-	NBR 7180/2016
Índice de Plasticidade	Não plástico	NBR 7180/2016
Massa especif. dos grãos (g/cm ³)	2,65	NBR 76458/2016
% Areia Grossa	0,0	
% Areia Média	3,76	
% Areia Fina	88,31	NBR 7181/2016
% Argila e Silte	7,93	
Diâmetro D ₁₀ (mm)	0,08	
Diâmetro D ₃₀ (mm)	0,16	
Diâmetro D ₆₀ (mm)	0,20	NBR 6502/2022
Coefficiente de Uniformidade (C _U)	2,50	
Coefficiente de Curvatura (C _C)	1,60	
Classificação SUCS	SP-SM	ASTM D2487 (2017)
Classificação AASHTO	A3 (0)	

Fonte: Autor, 2023.

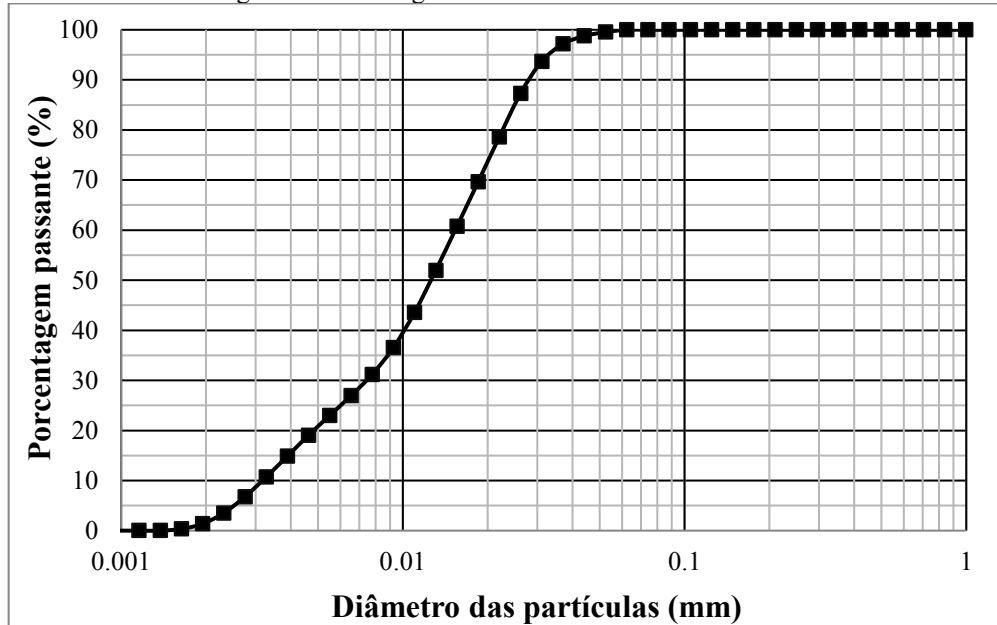
Figura 34 - Curva granulométrica da casca de ovo.



Fonte: Autor, 2023.

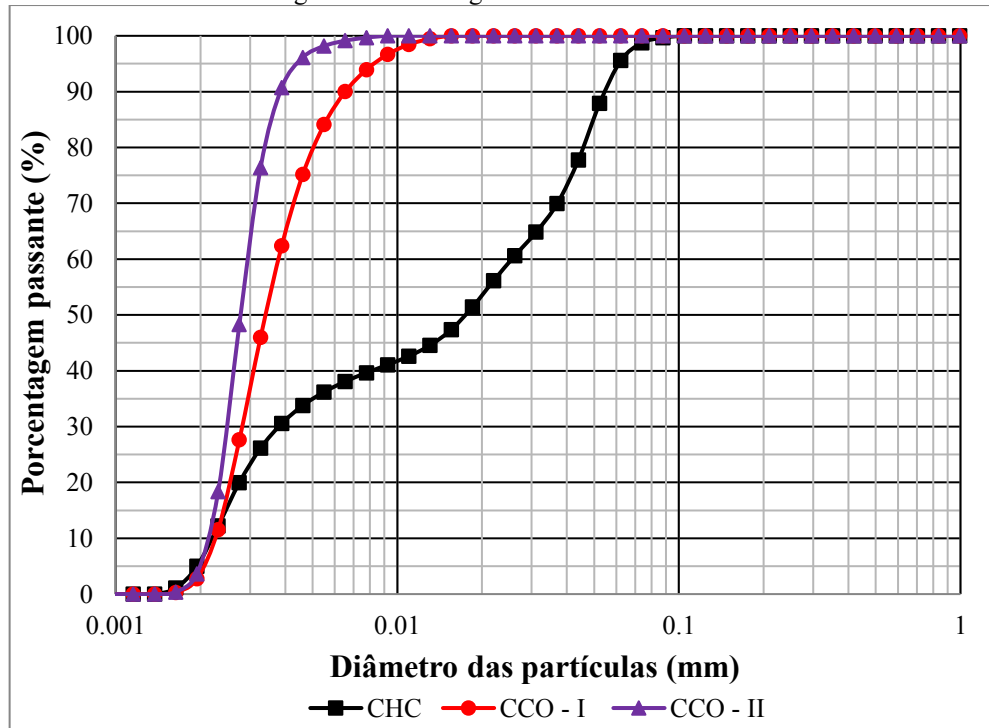
As análises granulométricas do cimento e das cales foram realizadas por meio da difração à laser. A Figura 35 apresenta a curva granulométrica do cimento, enquanto a Figura 36 compara as curvas granulométricas das cales.

Figura 35 - Curva granulométrica do cimento Portland.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 36 - Curva granulométrica das cales.



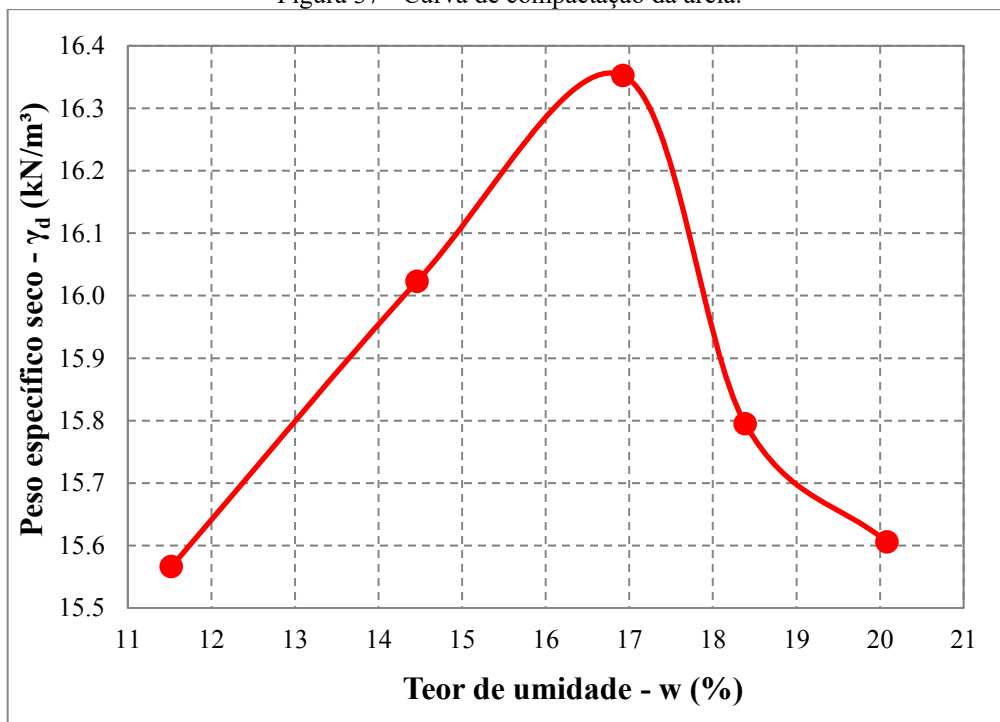
Fonte: Autor, 2023.

Tanto o cimento quanto as cales possuem predominantemente partículas com tamanhos inferiores a 0,075mm, classificando-se na categoria de siltes e argilas. As curvas granulométricas das cales de casca de ovo exibem um comportamento semelhante, evidenciando que as cales derivadas da casca de ovo são mais finas em comparação com a cal comercial.

Os valores das massas específicas dos grãos para as cales CHC, CCO-I e CCO-II são 2,50 g/cm³, 2,31 g/cm³ e 2,28 g/cm³, respectivamente. A massa específica dos grãos do cimento é igual a 3,13 g/cm³.

Em relação aos resultados do ensaio de compactação, a Figura 37 apresenta a curva de compactação da areia, indicando um peso específico seco máximo de 16,35 kN/m³ e uma umidade ótima de 16,9%.

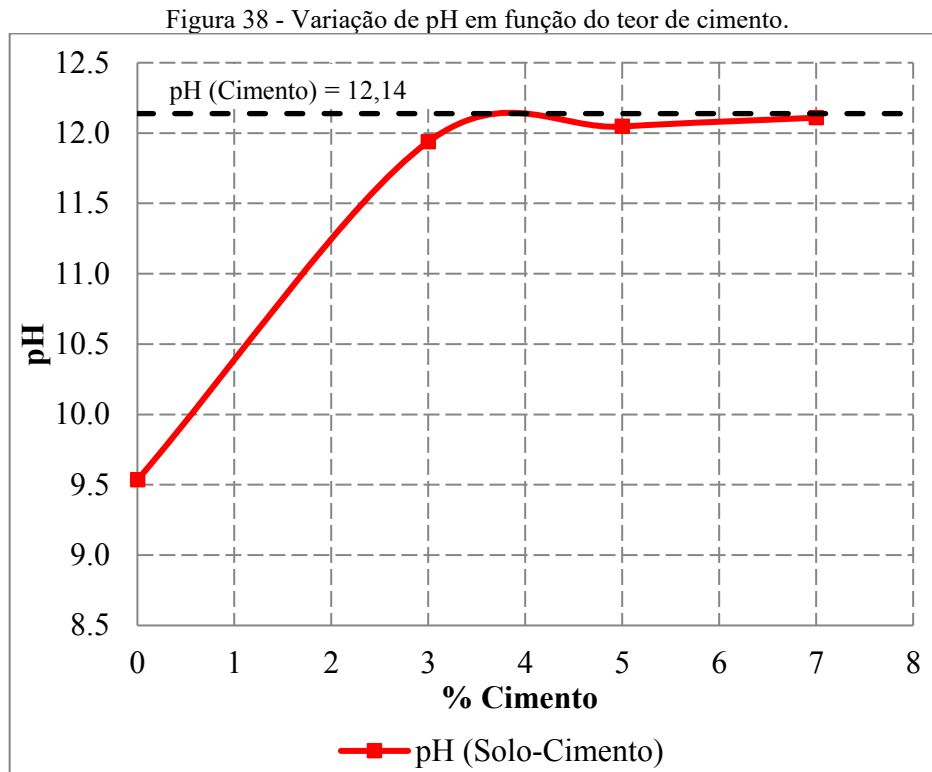
Figura 37 - Curva de compactação da areia.



Fonte: Autor, 2023.

4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A Figura 38 ilustra a variação do pH do solo-cimento em relação ao teor de cimento. A linha preta tracejada indica o pH do cimento puro, que é igual a 12,14.

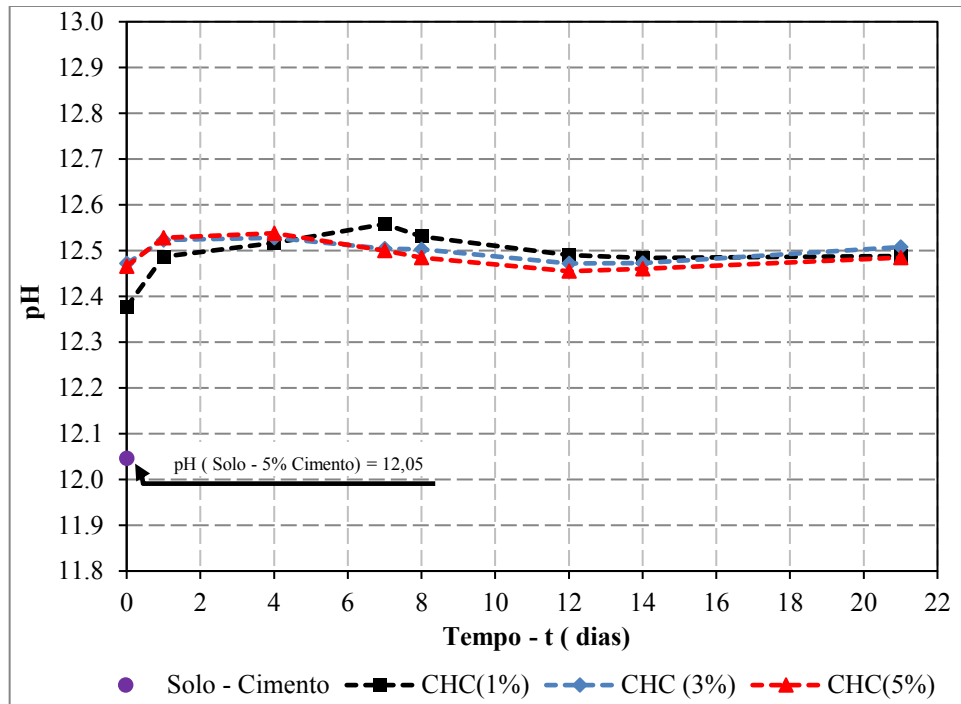


O pH do solo-cimento, para teores de cimento variando de 0% a 7%, situa-se entre 9,5 e 12,11. Esses valores são ligeiramente inferiores aos 12,4 recomendados para garantir uma reação pozolânica completa em solos estabilizados com cal. No entanto, destaca-se que as reações que ocorrem em solos estabilizados com cimento são distintas das que ocorrem em solos estabilizados com cal. Portanto, a faixa de pH encontrada pode ser considerada adequada para permitir a ocorrência de reações pozolânicas e o consequente aumento da resistência ao longo do tempo. Assim, os teores de cimento adotados neste estudo para a estabilização do solo-cimento (3%, 5% e 7%) foram considerados apropriados, pois apresentam um pH em torno de 12.

A Figura 39 ilustra a variação do pH ao longo do tempo para o solo-cimento-cal comercial (CHC). Vale ressaltar que o teor de cimento foi mantido constante em 5%, enquanto os teores de cal variaram entre 1%, 3% e 5%.

Nota-se que a adição da cal comercial (CHC) resulta em um aumento no valor do pH da mistura, considerando que o pH do solo-cimento é igual a 12,05. O pH do solo-cimento-cal varia na faixa entre 12,37 a 12,56, indicando pouca influência da variação do teor de cal e do tempo de hidratação no valor de pH.

Figura 39 – Variação do pH ao longo do tempo da mistura solo-cimento-cal comercial (CHC).



Fonte: Autor, 2023.

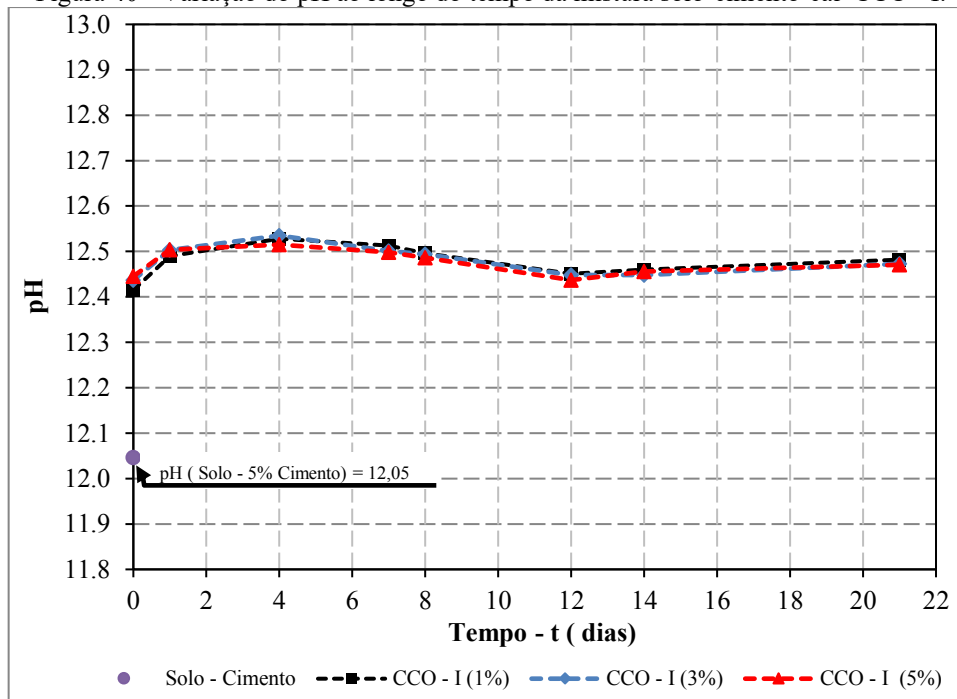
No que diz respeito às cales de casca de ovo, as Figuras 40 e 41 apresentam a variação do pH ao longo do tempo para as misturas solo-cimento-CCO-I e solo-cimento-CCO-II, respectivamente. Observa-se que, em ambas as misturas, o pH permanece constante com o aumento do teor de cal. Por outro lado, o pH tende a aumentar levemente nos primeiros dias antes de diminuir e estabilizar com o decorrer do tempo de hidratação. O pH de ambas as misturas, para diferentes teores de cal e tempos de hidratação, varia na faixa entre 12,4 a 12,5.

Dado que os valores de pH das misturas solo-cimento-cal são iguais ou superiores a 12,4, conclui-se que a alcalinidade do solo é suficiente para desencadear trocas catiônicas, reações iniciais e reações pozolânicas necessárias para o processo de estabilização do solo.

Os espectros de difração de raios-X das amostras de areia, cimento, cal comercial (CHC) e cal proveniente de casca de ovo (CCO) são ilustrados nas Figuras 42, 43, 44 e 45, respectivamente.

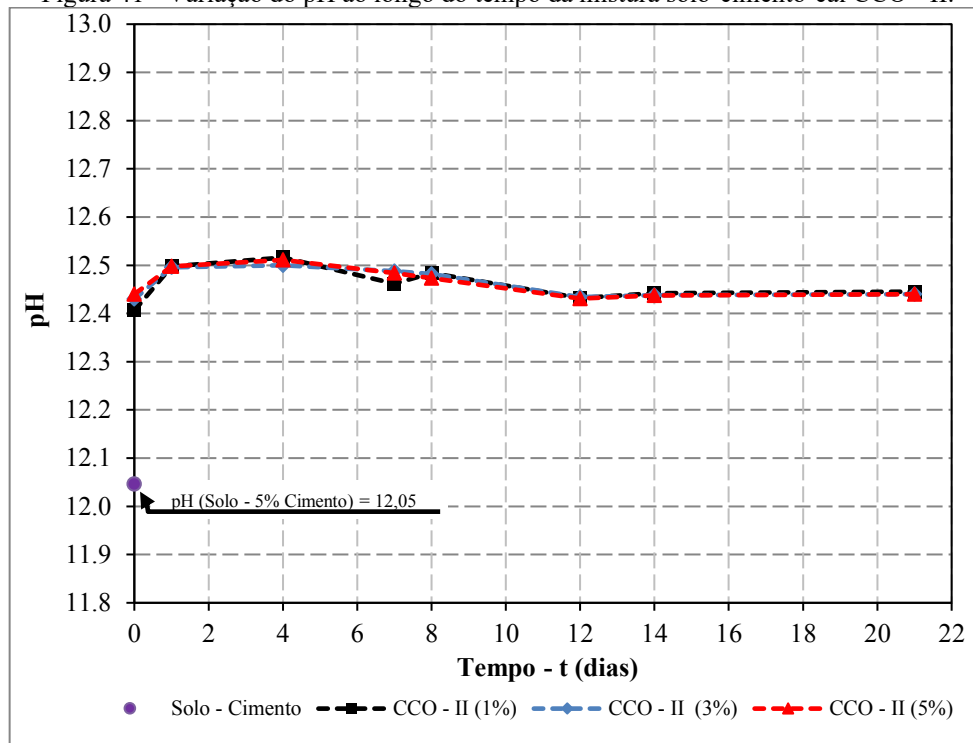
Conforme esperado, o espectro da areia (Figura 42) revela a predominância de quartzo (SiO_2), o que reforça a viabilidade da estabilização desse solo com cimento Portland. Os espectros das cales e do cimento indicam a predominância de partículas de óxido de cálcio (CaO), essenciais para desencadear reações pozolânicas e alcançar ganhos substanciais de resistência ao longo do tempo. É importante notar que há uma maior concentração de picos no espectro da cal comercial em comparação ao espectro da cal proveniente de cascas de ovos.

Figura 40 - Variação do pH ao longo do tempo da mistura solo-cimento-cal CCO - I.



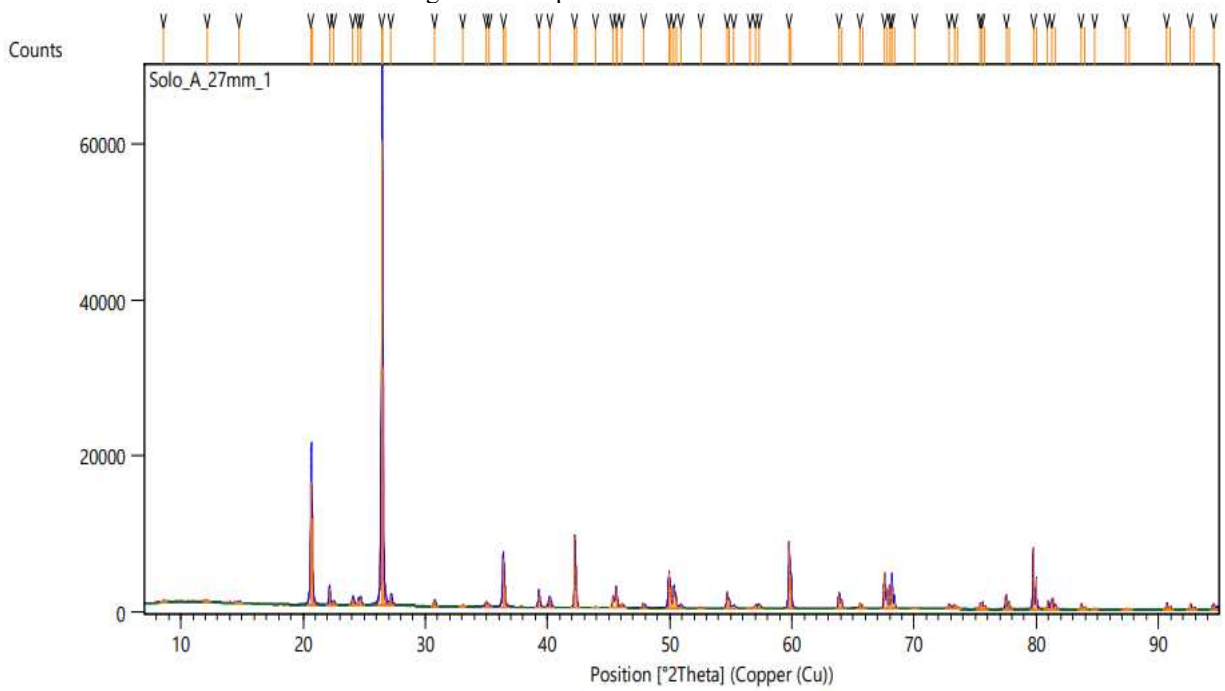
Fonte: Autor, 2023.

Figura 41 - Variação do pH ao longo do tempo da mistura solo-cimento-cal CCO - II.



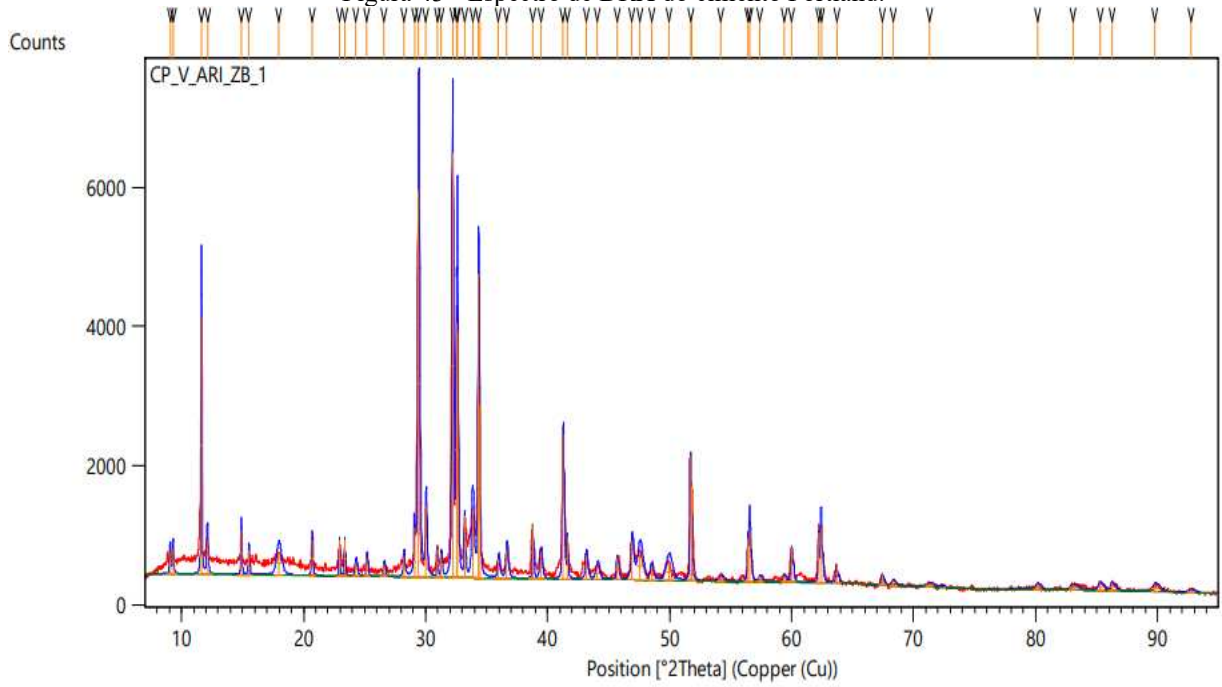
Fonte: Autor, 2023.

Figura 42 - Espectro de DRX da areia.



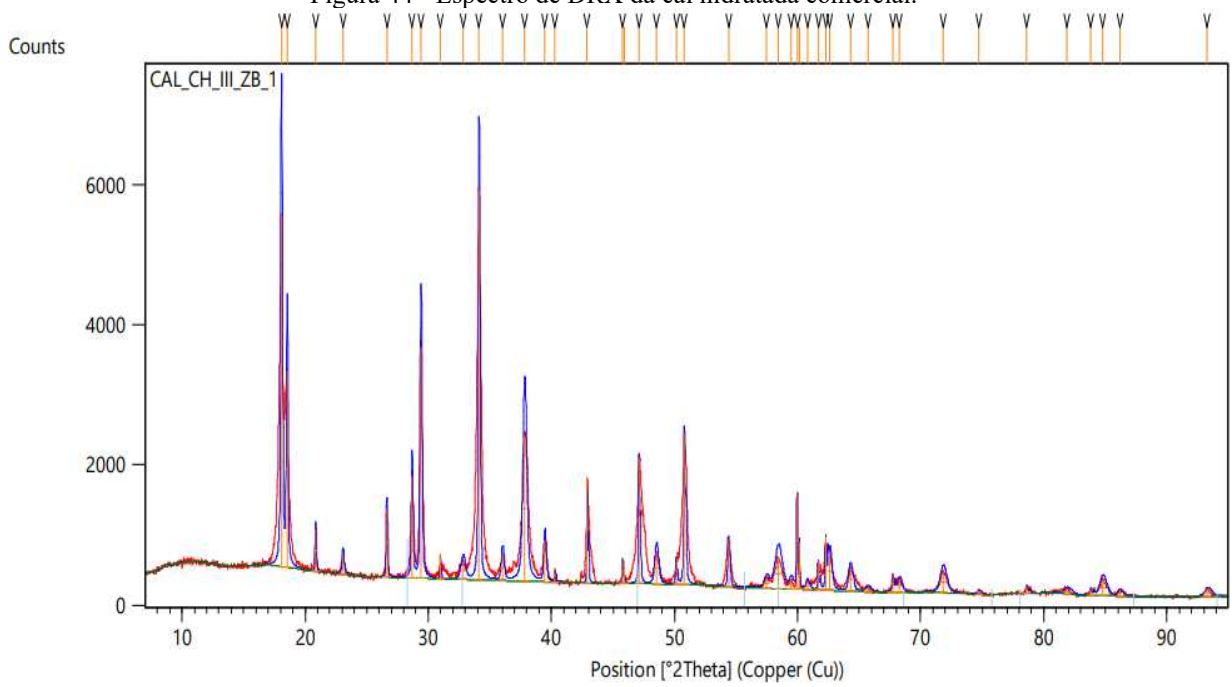
Fonte: Autor, 2023.

Figura 43 - Espectro de DRX do cimento Portland.



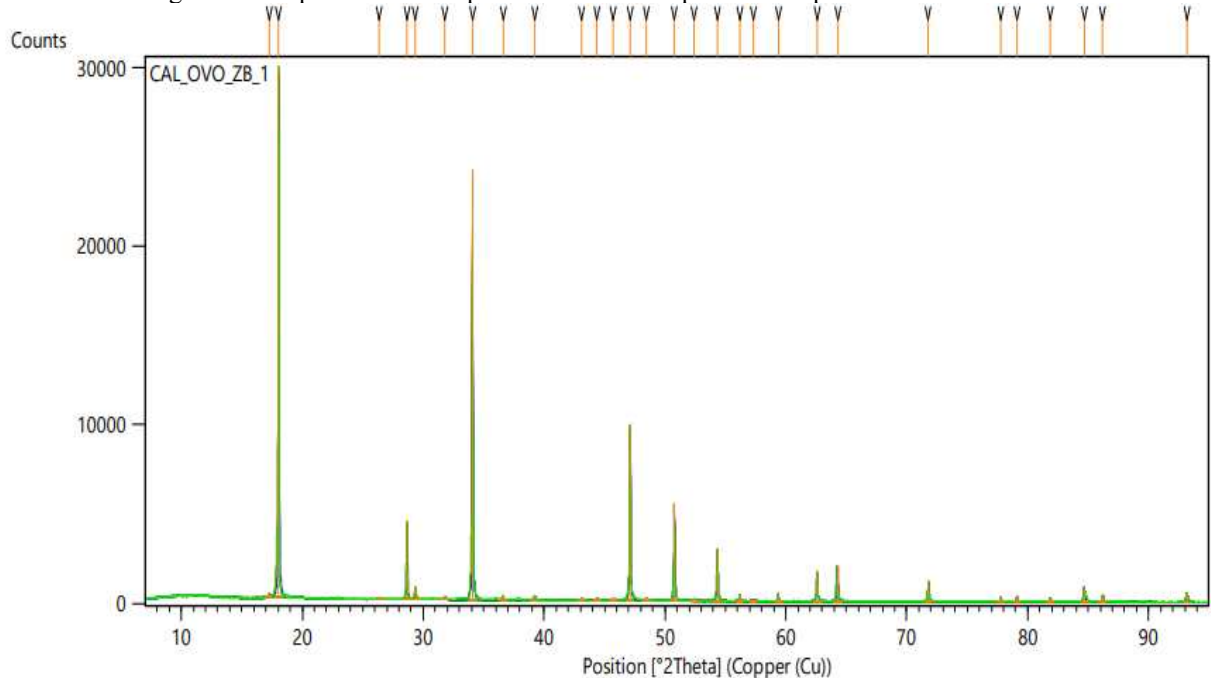
Fonte: Autor, 2023.

Figura 44 - Espectro de DRX da cal hidratada comercial.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 45 - Espectro de DRX para a cal hidratada produzida a partir da casca de ovo.



Fonte: Autor, 2023.

4.3 RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO SIMPLES E COMPRESSÃO DIAMETRAL

4.3.1 Mistura Solo-Cimento

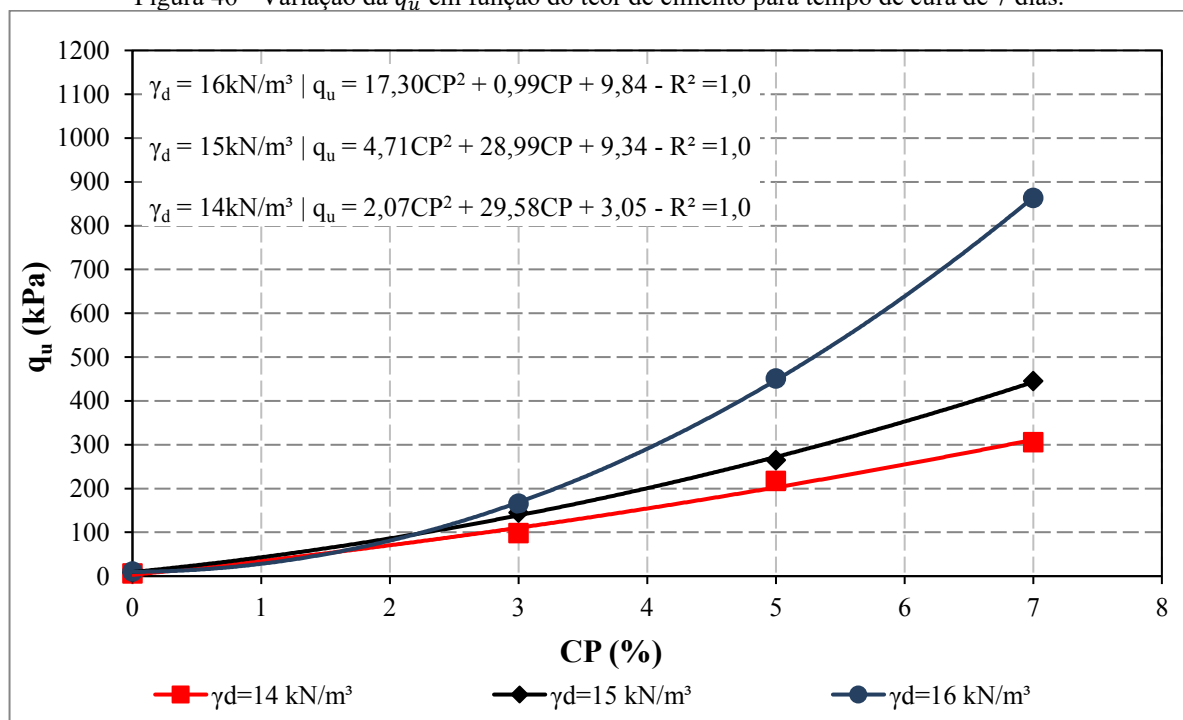
Esta seção apresenta e discute os resultados dos ensaios de compressão simples, compressão diametral e suas respectivas normalizações para as misturas solo-cimento. Para o tempo de cura de 7 dias, foram investigadas as influências do teor de cimento e do peso específico seco nas resistências à compressão simples e compressão diametral. Por outro lado, os resultados para o tempo de cura de 28 dias, com peso específico seco de 16kN/m^3 e teor de cimento de 5% são apresentados para comparação com os resultados de 7 dias na mesma condição.

A Figuras 46 e 47 mostram a variação da resistência à compressão simples (q_u) em função do teor de cimento para diferentes pesos específicos secos e teores de cimento, respectivamente. Na mesma linha, o gráfico de barras mostrado na Figura 48 compara diretamente os valores de q_u para diferentes pesos específicos secos e teores de cimento.

Para um teor de cimento de 7%, os valores de q_u são de 306 kPa, 436 kPa e 863 kPa para pesos específicos secos de 14 kN/m³, 15 kN/m³ e 16 kN/m³, respectivamente. Ao considerar um peso específico seco de 16 kN/m³, observa-se que os valores de q_u são de 10,6 kPa, 165 kPa, 451 kPa e 863 kPa para teores de cimento de 0%, 3%, 5% e 7%, respectivamente. Os resultados indicam uma influência positiva tanto do teor de cimento quanto do peso específico seco na resistência à compressão simples. O aumento do peso específico seco impacta positivamente devido ao aumento da energia de compactação, enquanto o aumento do teor de cimento está relacionado às facilidades para as reações responsáveis pelo aumento da resistência. As equações e o elevado coeficiente de determinação (R^2) apresentados nessas figuras ressaltam uma boa correlação entre a resistência à compressão simples e as variáveis analisadas.

Vale frisar que os valores de q_u em 7 dias obtidos neste trabalho são inferiores a 2,1 MPa recomendado pelo PCA (2002) e a NBR 12253/2012 para solos estabilizados com cimento.

Figura 46 - Variação da q_u em função do teor de cimento para tempo de cura de 7 dias.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 47 - Variação da q_u em função do peso específico para tempo de cura de 7 dias.

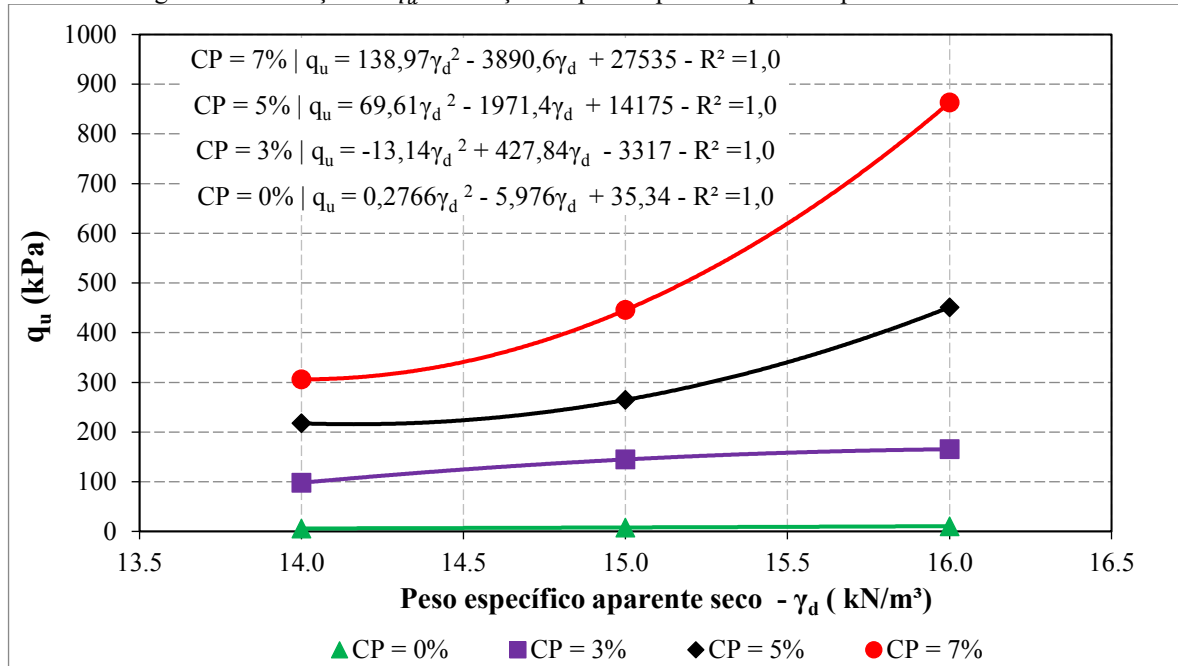
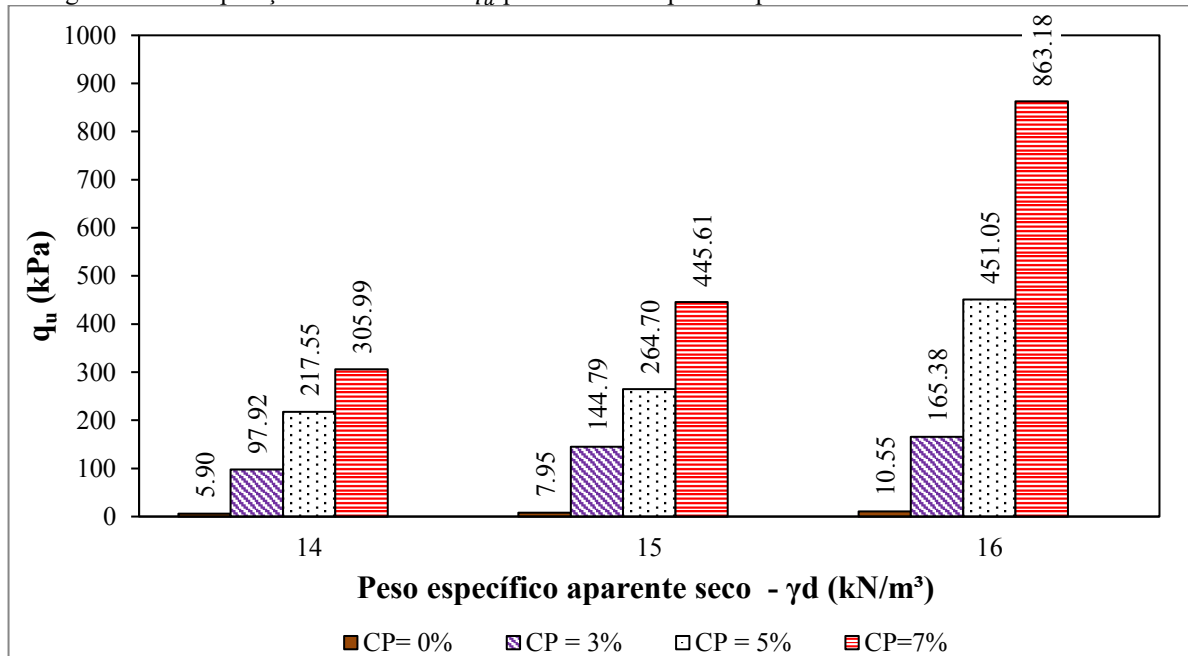


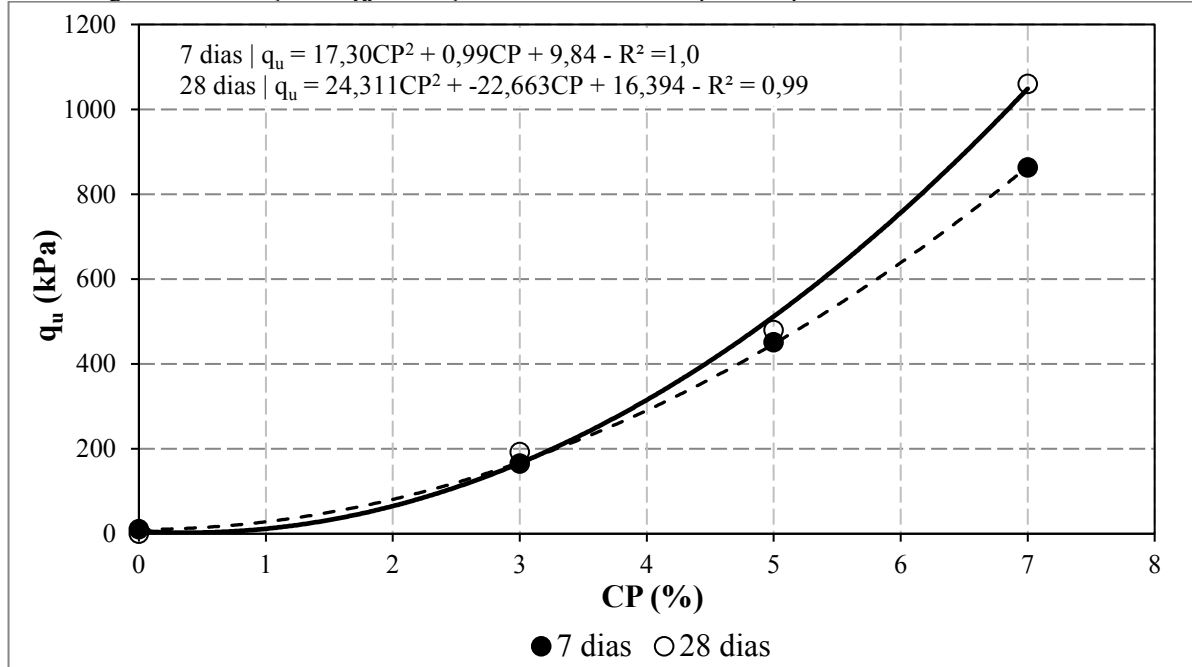
Figura 48 - Comparação dos valores de q_u para diferentes pesos específicos e teores de cimento - 7 dias.



A influência do tempo de cura no aumento de q_u é evidenciada nas Figuras 49 e 50, indicando maiores resistências em 28 dias em comparação com as de 7 dias, devido às reações

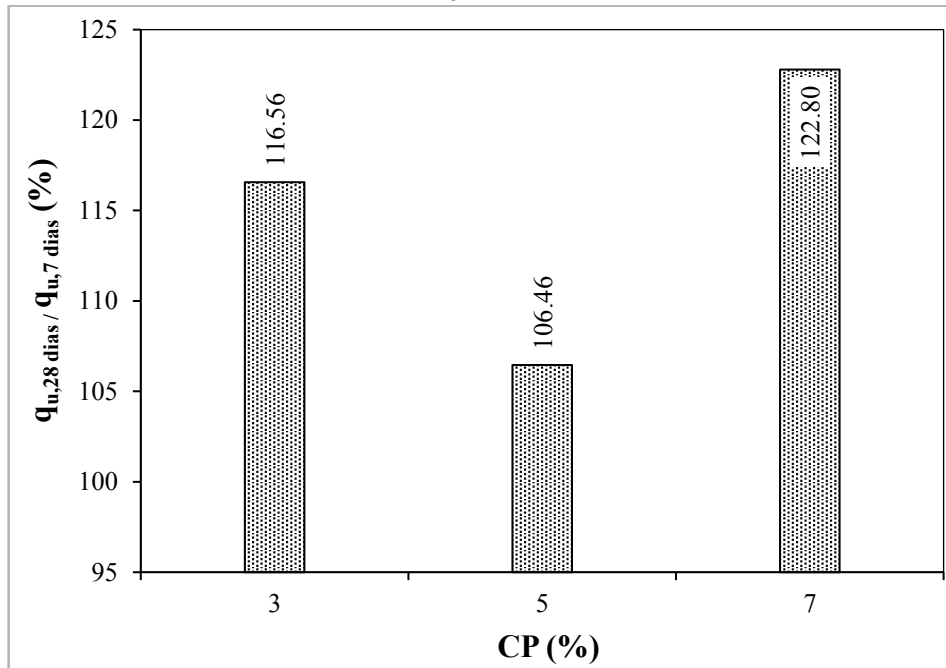
pozolônicas que ocorrem ao longo do tempo. Na Figura 50, é possível observar que a porcentagem da razão entre as resistências de 28 dias e 7 dias varia entre 106% e 123%.

Figura 49 - Variação da q_u em função do teor de cimento para tempos de cura de 7 dias e 28 dias.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 50 - Razão entre $q_{u,28 \text{ dias}}$ e $q_{u,7 \text{ dias}}$ para diferentes teores de cimento e peso específico seco de 16 kN/m^3 .

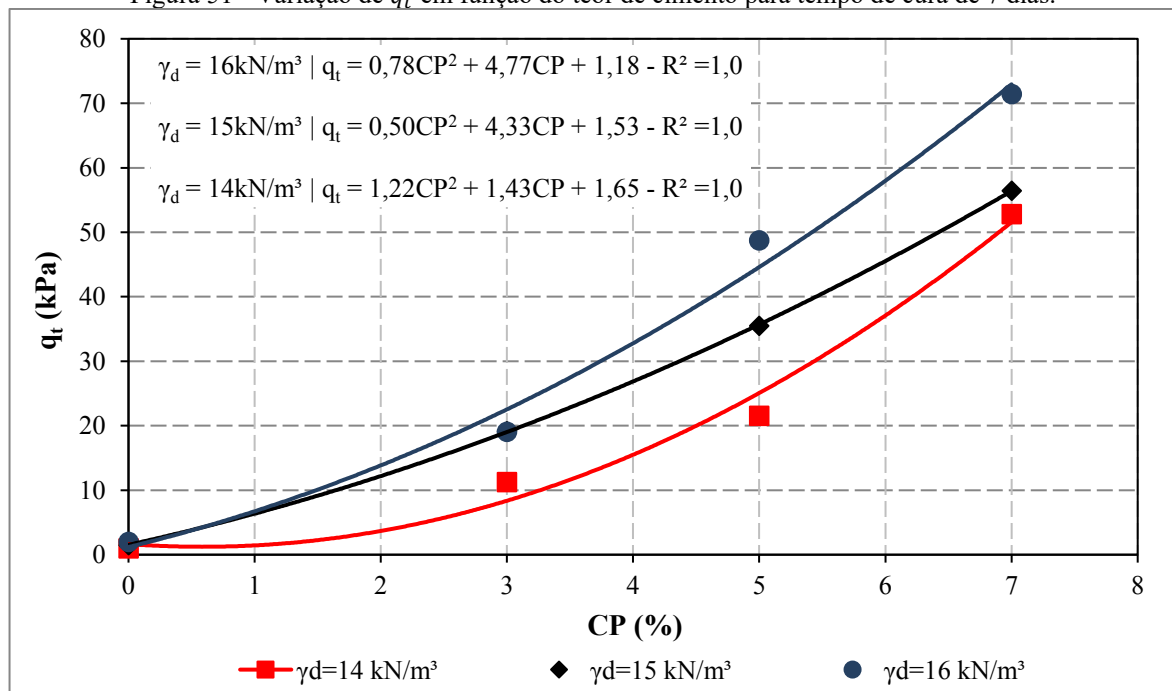


Fonte: Autor, 2023.

A influência da variação dos teores de cimento e do peso específico nos valores da resistência de compressão diametral (q_t) é apresentada nas Figuras 51 e 52, respectivamente. O gráfico de barras mostrado na Figura 53 compara diretamente os valores de q_t para diferentes pesos específicos secos e teores de cimento.

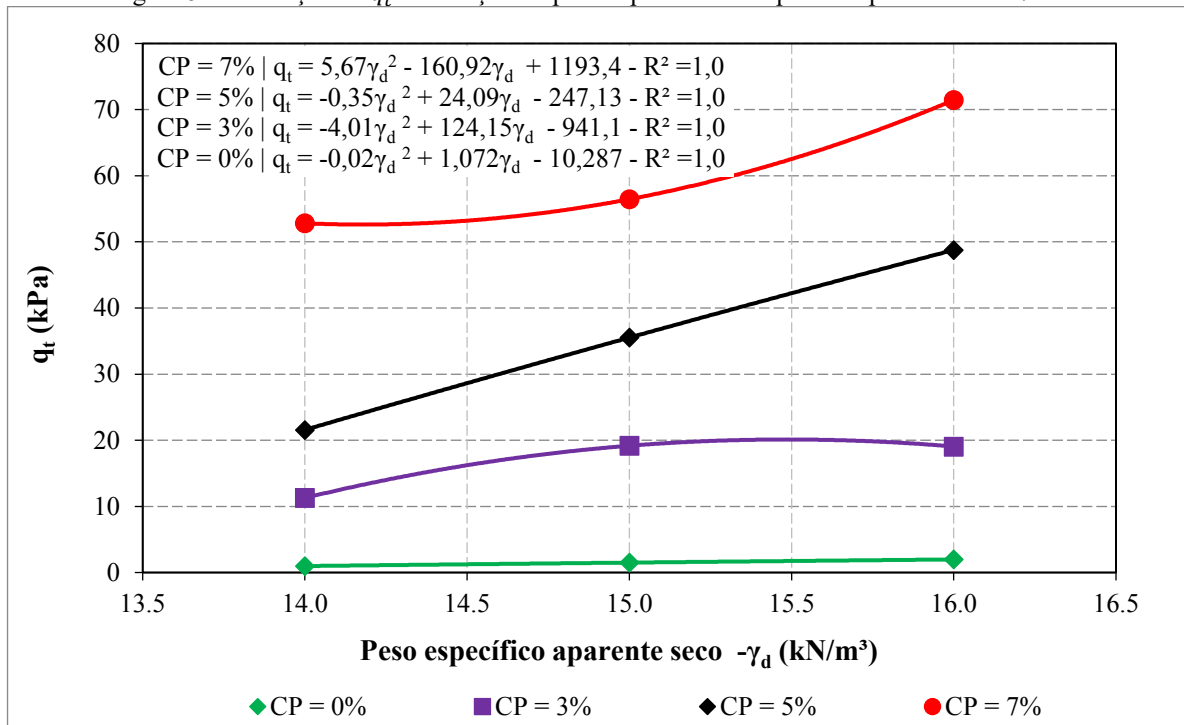
Para um teor de cimento de 7%, os valores de q_t são de 52,8 kPa, 56,5 kPa e 71,4 kPa para pesos específicos secos de 14 kN/m³, 15 kN/m³ e 16 kN/m³, respectivamente. Ao considerar um peso específico seco de 16 kN/m³, observa-se que os valores de q_t são de 2 kPa, 19 kPa, 48,8 kPa e 71,4 kPa para teores de cimento de 0%, 3%, 5% e 7%, respectivamente. Como ocorreu com os valores de resistência à compressão simples, os resultados das Figuras 51 a 53 indicam uma influência positiva tanto do teor de cimento quanto do peso específico seco na resistência à compressão diametral. O aumento do peso específico seco impacta positivamente devido ao aumento da energia de compactação, enquanto o aumento do teor de cimento está relacionado às facilidades para as reações responsáveis pelo aumento da resistência. As equações e o elevado coeficiente de determinação (R^2) apresentados nessas figuras ressaltam uma boa correlação entre a resistência à compressão diametral e as variáveis analisadas.

Figura 51 - Variação de q_t em função do teor de cimento para tempo de cura de 7 dias.



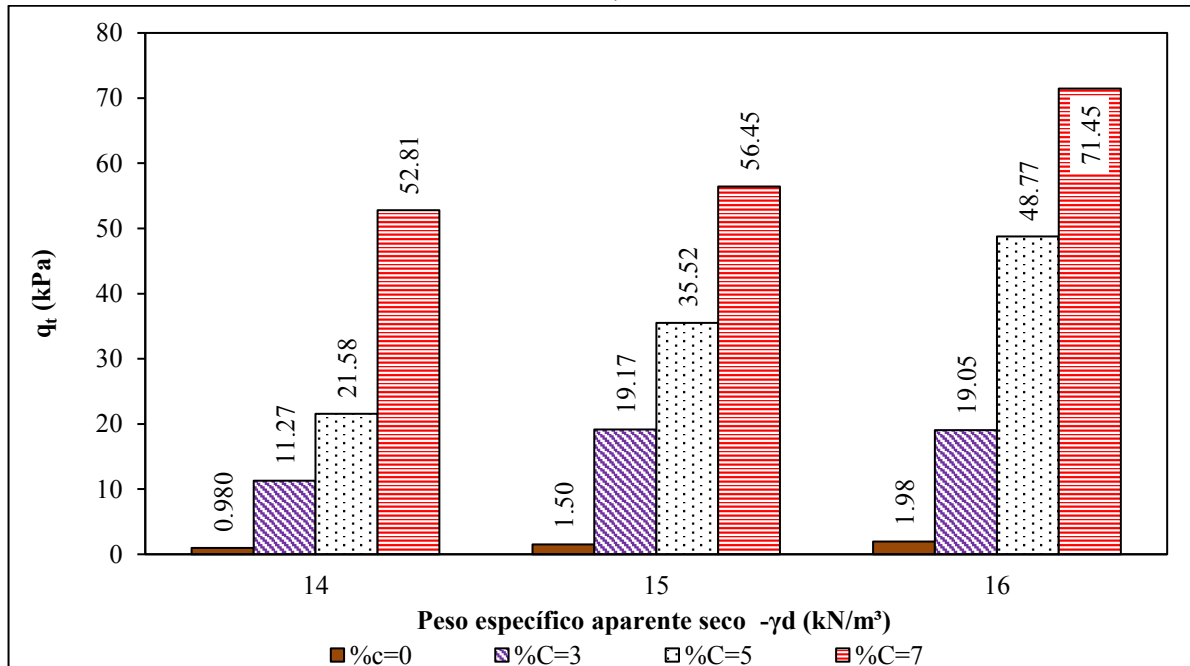
Fonte: Autor, 2023.

Figura 52 - Variação da q_t em função do peso específico seco para tempo de cura de 7 dias.



Fonte: Autor, 2023.

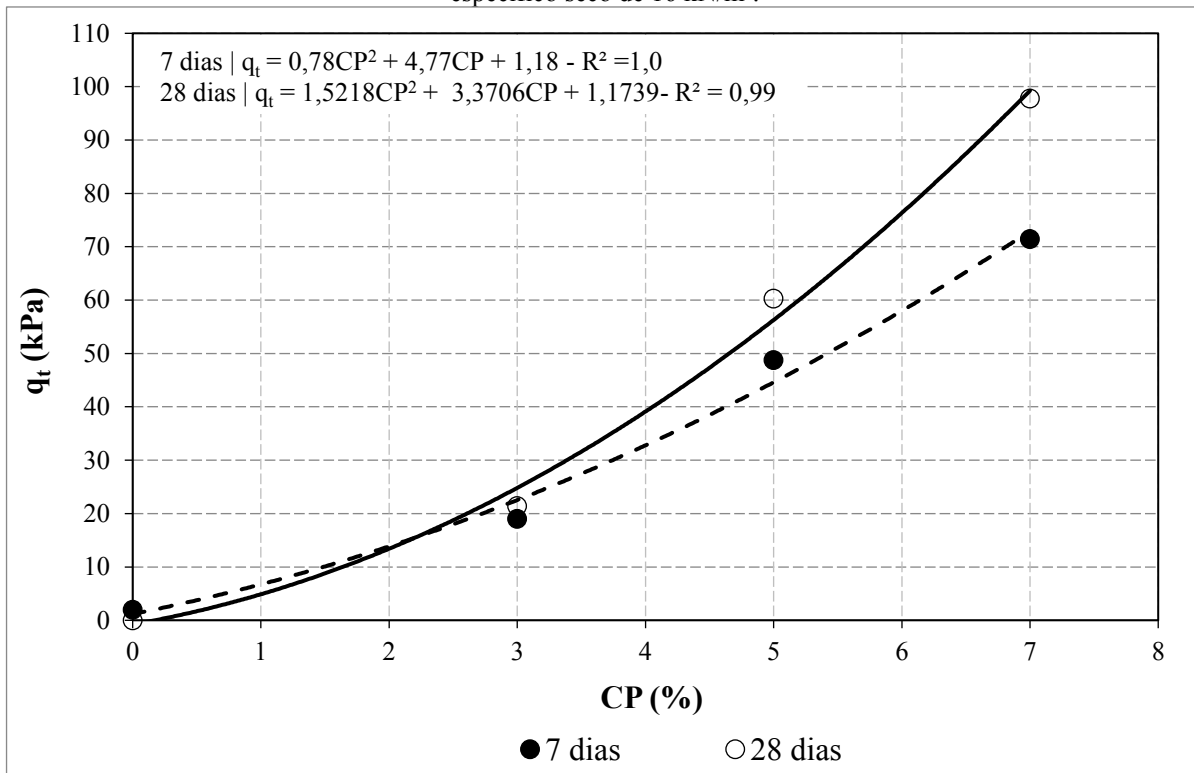
Figura 53 - Comparação dos valores de q_t para diferentes pesos específicos e teores de cimento para tempo de cura de 7 dias.



Fonte: Autor, 2023.

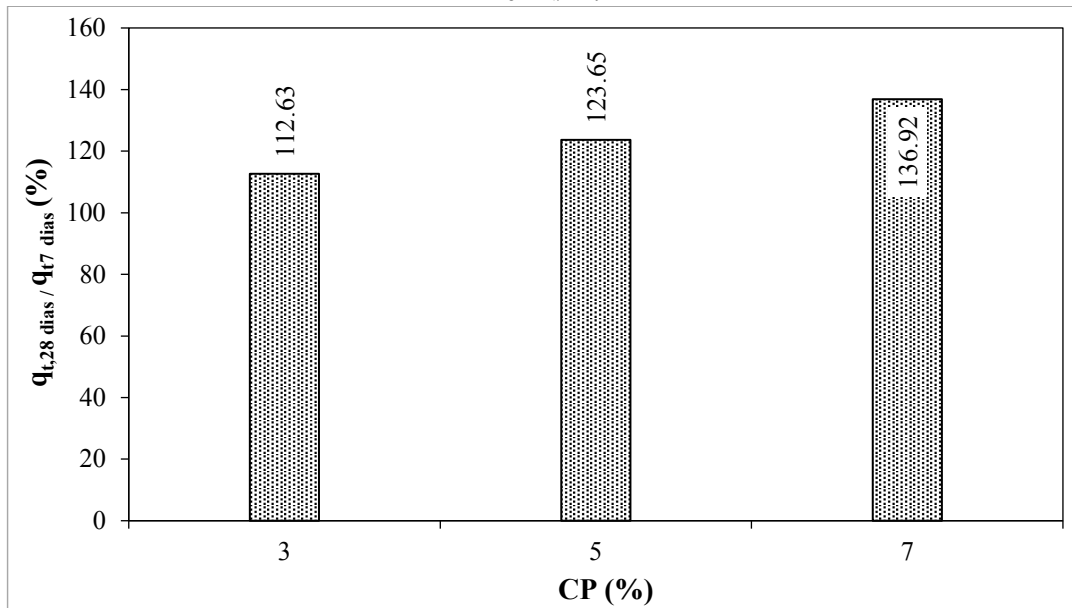
A influência do tempo de cura no aumento de q_t é evidenciada nas Figuras 54 e 55, indicando maiores resistências em 28 dias em comparação com as de 7 dias, devido às reações pozolânicas que ocorrem ao longo do tempo. Em ambos os tempos de cura, a resistência à compressão diametral aumenta de forma não linear com o teor de cimento. Na Figura 55, é possível observar que a porcentagem da razão entre as resistências à compressão diametral de 28 dias e 7 dias varia entre 112,6% e 136,9%.

Figura 54 - Variação da q_t em função do teor de cimento para tempos de cura de 7 dias e 28 dias em um peso específico seco de 16 kN/m³.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 55 - Relação entre $q_{t,28 \text{ dias}}$ e $q_{t,7 \text{ dias}}$ para diferentes teores de cimento em um peso específico seco de 16 kN/m^3 .

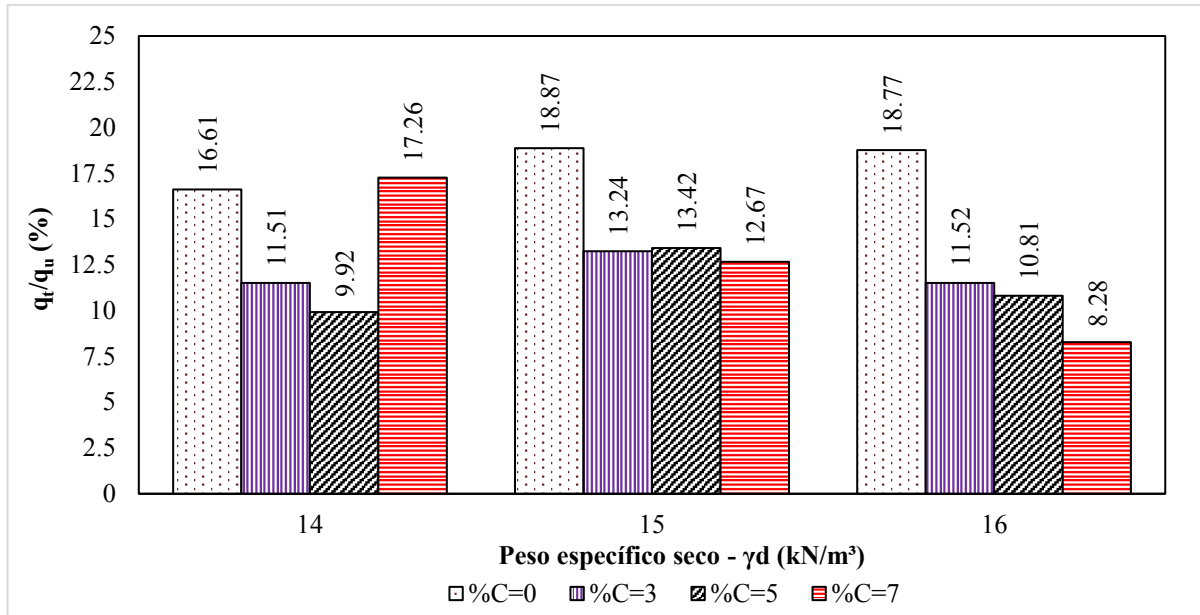


Fonte: Autor, 2023.

A razão entre a resistência à compressão diametral (q_t) e resistência à compressão simples (q_u) para os tempos de cura de 7 e 28 dias é mostrada nas Figuras 56 e 57, respectivamente. Na Figura 56, observa-se uma variação da razão q_t/q_u entre 8,28% e 18,87% para diferentes teores de cimento e pesos específicos. A média da razão q_t/q_u é de 18,1% para o teor de cimento de 0%, 12,1% para o teor de cimento de 3%, 11,4% para o teor de cimento de 5%, e 12,7% para o teor de cimento de 7%. Na Figura 57, referente ao período de cura de 28 dias, a razão q_t/q_u varia entre 9,23% e 12,56%.

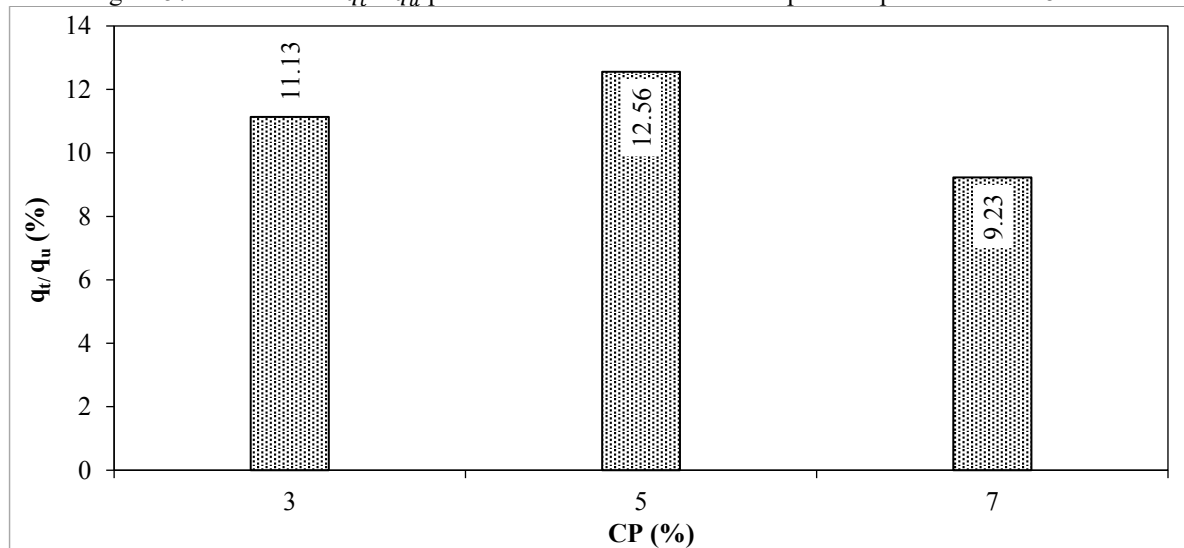
Vale pontuar que os valores da razão q_t/q_u do presente trabalho estão dentro da faixa de 10% a 20% geralmente apresentada na literatura para solos estabilizados com cimento.

Figura 56 - Razão entre q_t e q_u para diferentes pesos específicos e teores de cimento para tempo de cura de 7 dias.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 57 - Razão entre q_t e q_u para diferentes teores de cimento para tempo de cura de 28 dias.

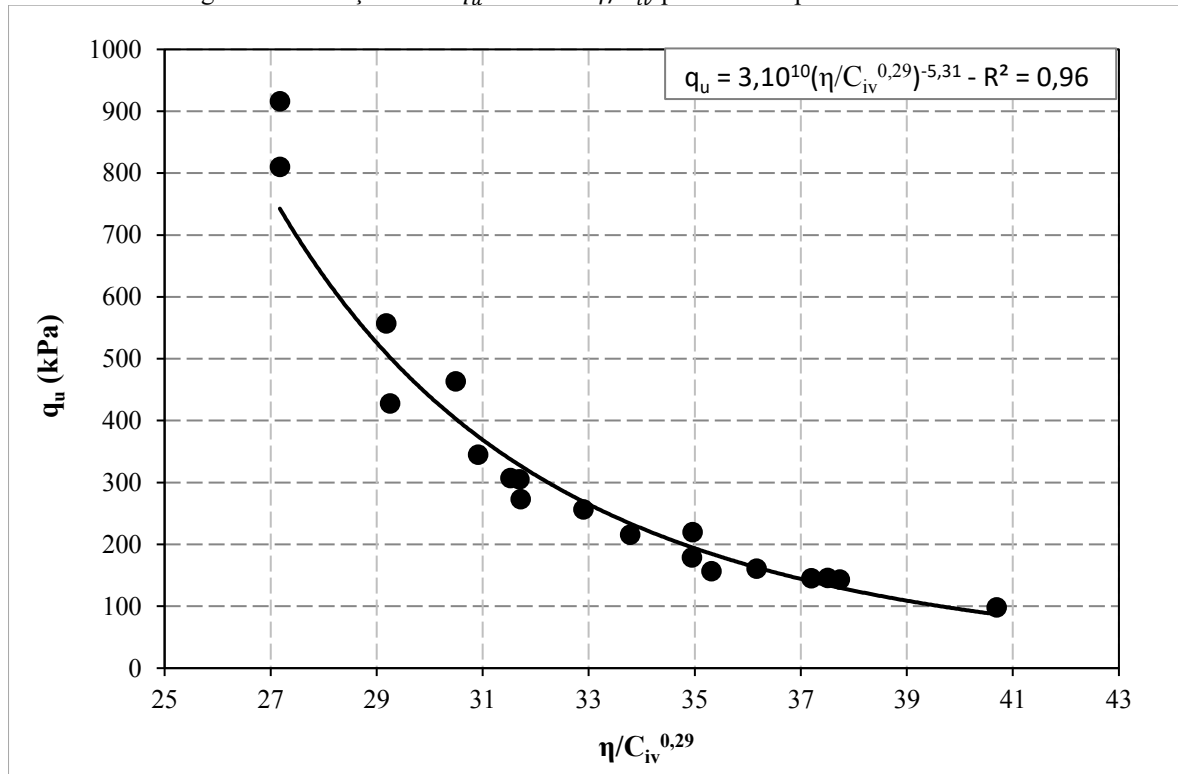


Fonte: Autor, 2023.

As Figuras 58 a 61 apresentam a normalização dos resultados em termos da razão de porosidade (η) e teor de cimento (C_{iv}), servindo como um método racional de dosagem para estimar os valores de q_t e q_u . Pelas figuras, observa-se uma forte correlação entre as resistências de compressão e a razão η/C_{iv} . Os coeficientes k que proporcionam o melhor ajuste das curvas de q_u para um tempo de cura de 7 dias e 28 dias são respectivamente 0,29 e 0,95. Para q_t , os coeficientes k encontrados para as curvas correspondente aos tempos de cura

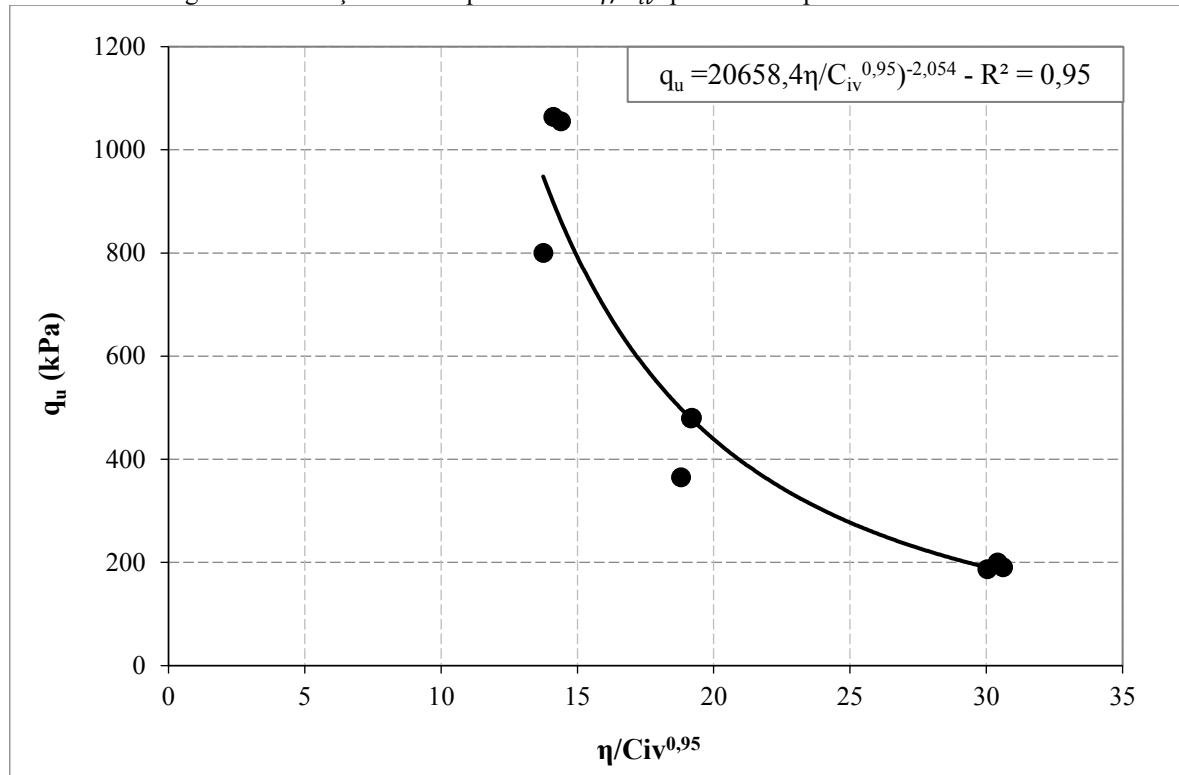
7 dias e 28 dias, são respectivamente 1,04 e 1,22. Como explicado no capítulo de fundamentação teórica, valores de k inferiores a 1 (um) indicam que o efeito da porosidade é mais significativo do que o do teor de cimento, enquanto valores de k maiores que 1 (um) indicam o comportamento oposto.

Figura 58 - Relação entre q_u e a razão η/C_{iv} para um tempo de cura de 7 dias.



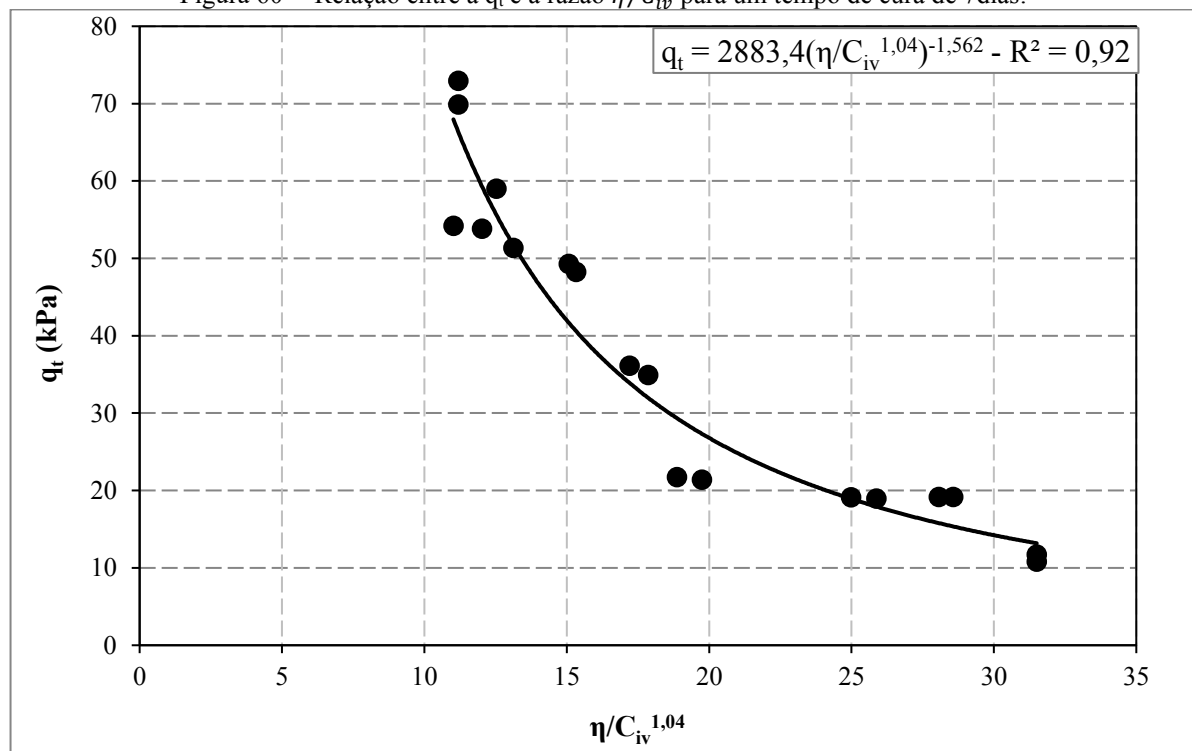
Fonte: Autor, 2023.

Figura 59 - Relação entre a q_u e a razão η/C_{iv} para um tempo de cura de 28 dias.



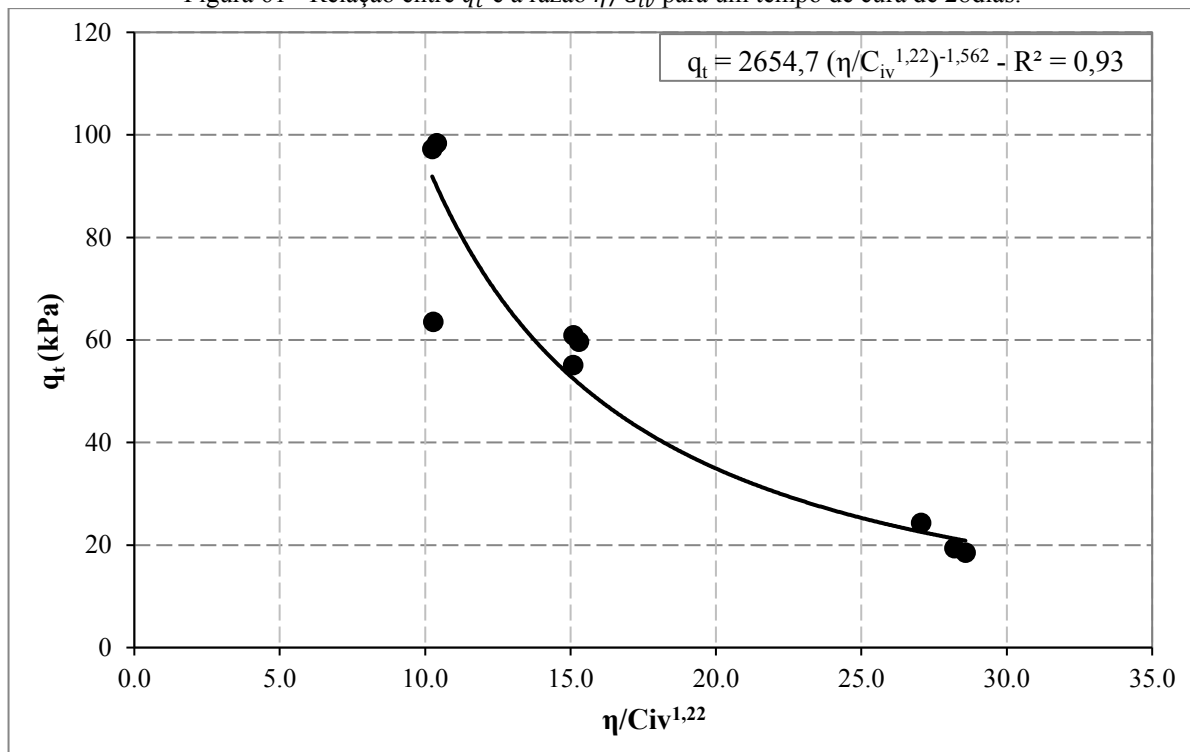
Fonte: Autor, 2023.

Figura 60- - Relação entre a q_t e a razão η/C_{iv} para um tempo de cura de 7 dias.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 61 - Relação entre q_t e a razão η/C_{iv} para um tempo de cura de 28 dias.



Fonte: Autor, 2023.

4.3.2 Mistura Solo-Cimento-Cal

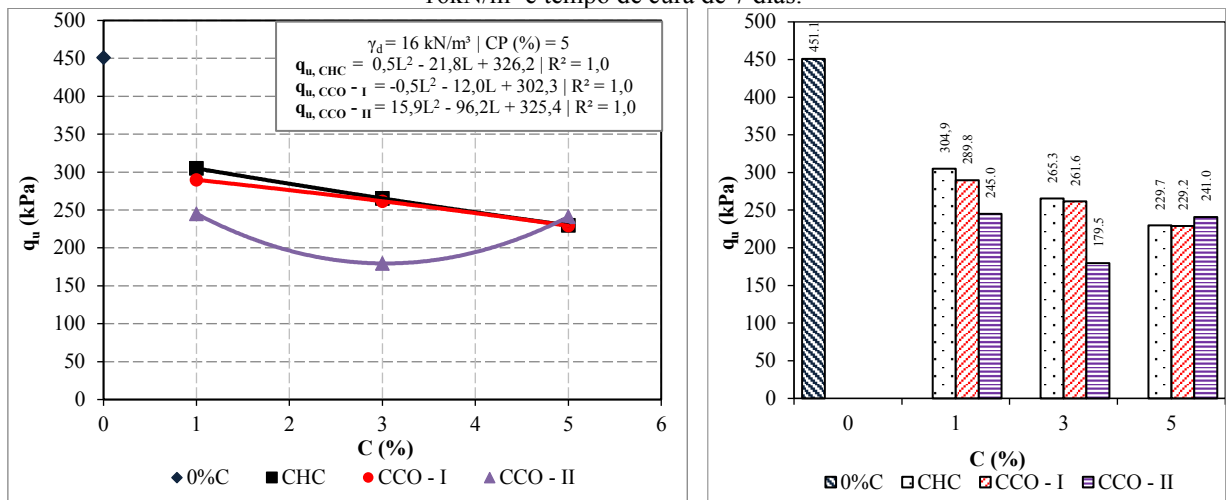
Os resultados dos ensaios de compressão simples, compressão diametral e suas respectivas normalizações para as misturas contendo solo, cimento e cal são apresentados e discutidos neste item.

Nas figuras, independente da origem e temperatura de cal, o teor de cal é representado pela letra C. É importante frisar novamente que CHC denota cal hidratada comercial, CCO-I refere-se à cal de casca de ovo incinerada a 900°C e CCO-II corresponde à cal de casca de ovo incinerada a 100°C.

As Figuras 62 e 63 ilustram a variação de q_u em função do teor de cal para os tempos de cura de 7 dias e 28 dias. Diferente das misturas solo-cimento, observa-se que a adição de cal tende a diminuir os valores de q_u . Em ambos os tempos de cura, as curvas das misturas com adição de CHC e CCO-I apresentam praticamente o mesmo comportamento. No tempo de cura de 7 dias, a resistência q_u dessas misturas reduz de 300 kPa para 241 kPa à medida que o teor de cal aumenta de 1% para 5%.

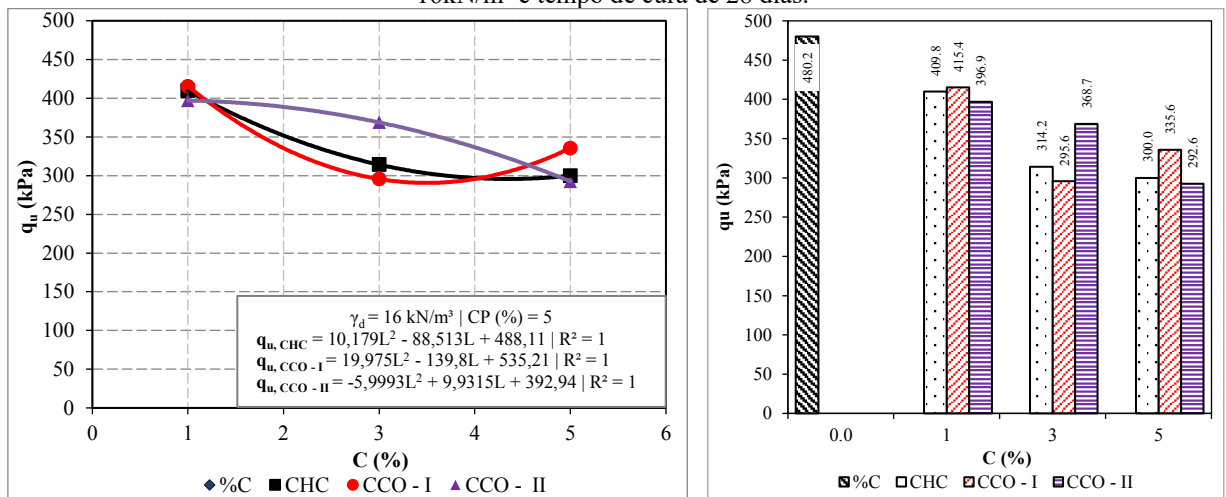
Para tempo de cura de 7 dias e teores de cal inferiores a 5%, as misturas com adição de CCO-II apresentaram desempenho inferior em relação aos das demais misturas. A maior discrepância entre os valores de q_u no tempo de 28 dias foi observada no teor de cal de 3%, onde q_u das misturas com CHC, CCO-I e CCO-II são iguais a 368,7kPa, 314,2 kPa e 292,6 kPa, respectivamente.

Figura 62 - Variação da q_u em função do teor de cal para teor de cimento de 5%, peso específico seco de 16kN/m³ e tempo de cura de 7 dias.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 63 - Variação da q_u em função do teor de cal para teor de cimento de 5%, peso específico seco de 16kN/m³ e tempo de cura de 28 dias.



Fonte: Autor, 2023.

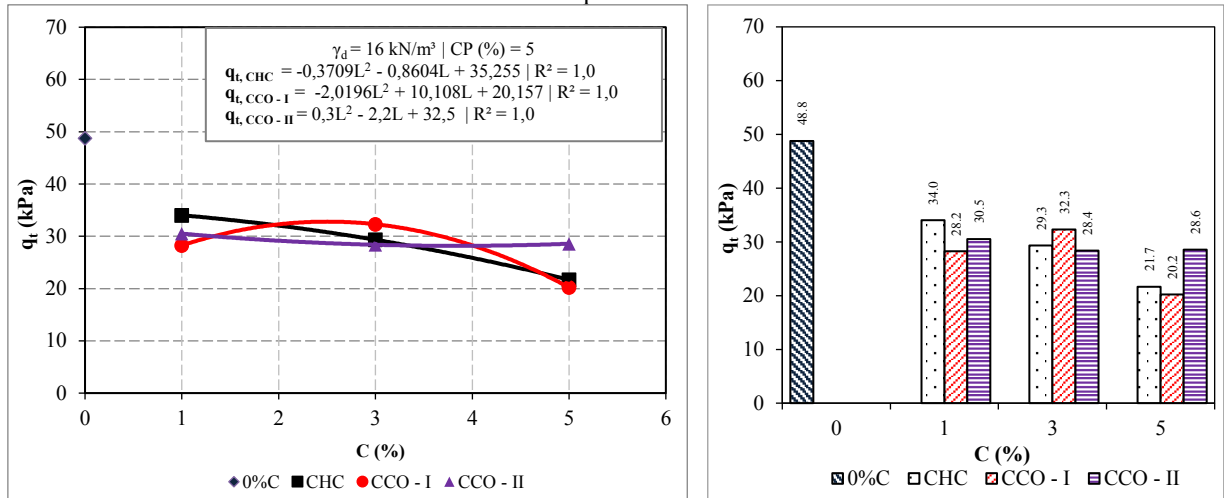
A variação de q_t em função do teor de cal para os tempos de cura de 7 dias e 28 dias é apresentada nas Figuras 64 e 65. Como ocorreu com os valores de q_u , a adição de cal, independentemente da sua origem e do seu teor, provoca a diminuição dos valores de q_t .

Aos 7 dias de cura, a resistência à compressão simples de mistura solo com 5% de cimento é de 48,8 kPa, um valor superior aos observados em todas misturas com adição de cal. No tempo de cura de 7 dias, a resistência q_t das misturas com cal diminui de 44,1 kPa para 27,3 kPa à medida que o teor de cal aumenta de 1% para 5%. Não há um padrão de comportamento bem definido em relação ao tipo de cal que proporciona maiores valores de q_t , considerando que esses valores variaram com o teor de cal.

Para o tempo de cura de 28 dias, a adição de cal contribui para a redução dos valores de q_t . A resistência q_t das misturas com cal reduz de 34 kPa para 20,2 kPa à medida que o teor de cal aumenta de 1% para 5%. Esses valores são menores que 60,3 kPa medidos em misturas com 5% de cimento e sem adição de cal. Para teores de cal superiores que 1%, as misturas com CCO-II apresentaram valores mais elevados de q_t em comparação com os valores das misturas com CCO-I e CHC.

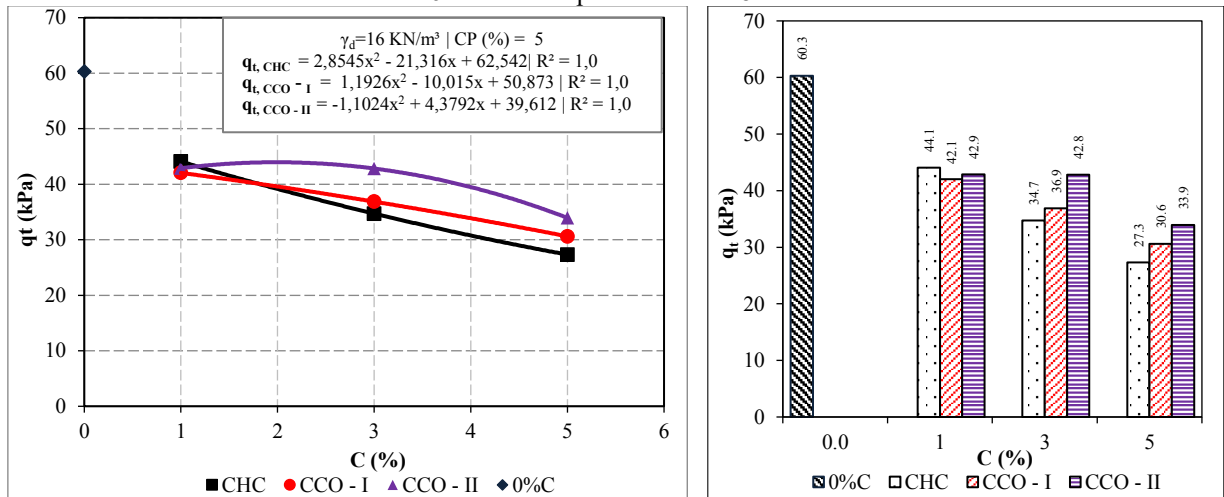
Vale frisar que, tradicionalmente, solos arenosos são estabilizados com cimento. Apesar do pH das misturas com cal ser considerado suficiente para a ocorrência das reações pozolânica, observa-se que os valores de q_u e q_t foram prejudicados com a adição de cal em ambos os tempos de cura. A adição de cal melhora a trabalhabilidade e plasticidade das misturas, sendo que em alguns estudos, contribui também para o aumento da resistência. É provável que a adição de cal neste estudo retardou ou prejudicou as reações pozolânicas responsáveis pelo ganho das resistências das misturas solo-cimento-cal. Futuras investigações por meio de análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) são necessárias para melhor entendimento da evolução da cimentação ao longo do tempo.

Figura 64 - Variação da q_t em função do teor de cal para teor de cimento de 5%, peso específico seco de 16kN/m³ e tempo de cura de 7 dias.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 65- Variação da q_t em função do teor de cal para teor de cimento de 5%, peso específico seco de 16kN/m³ e tempo de cura de 28 dias.



Fonte: Autor, 2023.

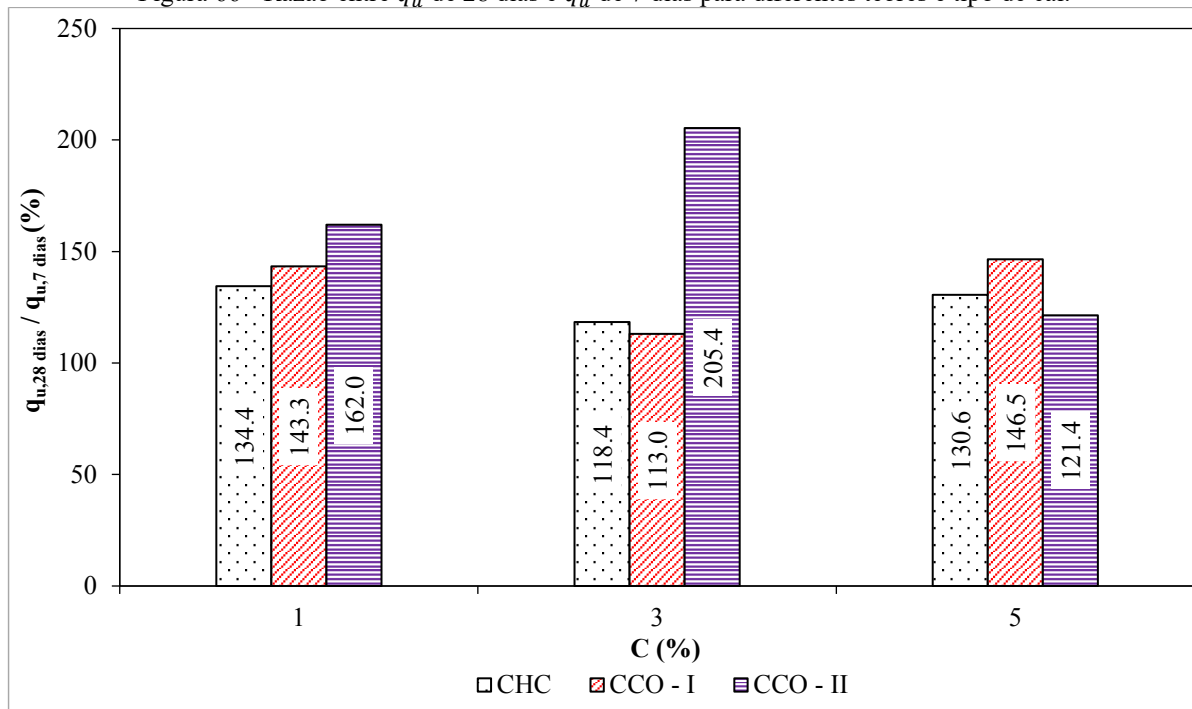
A influência do tempo de cura nos valores das resistência à compressão simples e resistência compressão diametral, para diferentes teores de cal, pode ser analisada nas Figuras 66 e 67, respectivamente. Em todos os casos ilustrados na Figura 66, valores de q_u aos 28 dias são maiores em comparação aos de 7 dias, quando são comparados corpos-de-prova moldados na mesma condição.

A porcentagem da razão entre q_u aos 28 dias e aos 7 dias varia de 113% a 205,4%. Para teores de cal de 1% e 3%, nota-se que as misturas com CCO-I apresentaram maiores razões $q_{u,28\text{dias}}/q_{u,7\text{dias}}$, correspondendo a 162% e 205,4%. Por outro lado, para o teor de cal de 5%, a maior razão $q_{u,28\text{dias}}/q_{u,7\text{dias}}$ foi observada em misturas com CCO-II. As razões

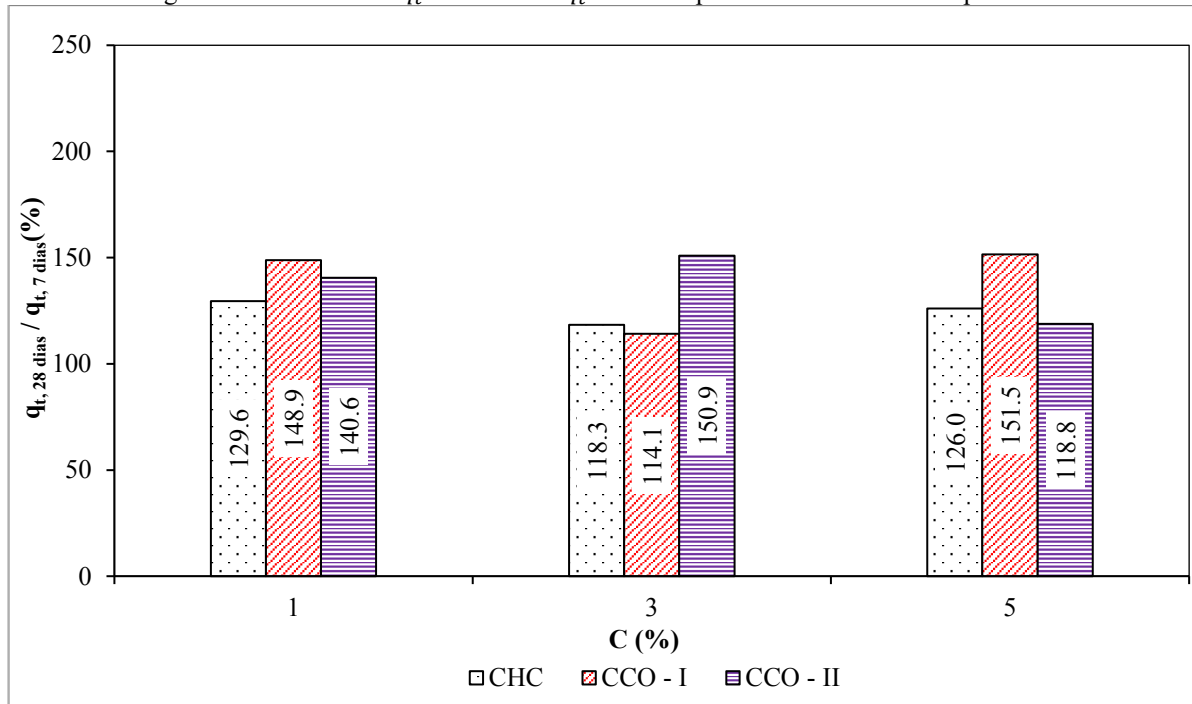
$q_{u,28\text{dias}}/q_{u,7\text{dias}}$ das misturas com CHC tendem a ser menores, independentemente do teor de cal.

Com relação à resistência à compressão diametral, a porcentagem da razão entre q_t aos 28 dias e aos 7 dias varia de 114,1% a 151,5. Para teores de cal de 1% e 5%, nota-se que as misturas com CCO-I apresentaram maiores razões $q_{u,28\text{dias}}/q_{u,7\text{dias}}$, correspondendo a 148,9% e 151,5%. Por outro lado, para o teor de cal de 3%, a maior razão $q_{t,28\text{dias}}/q_{t,7\text{dias}}$ foi observada em misturas com CCO-II.

Figura 66 - Razão entre q_u de 28 dias e q_u de 7 dias para diferentes teores e tipo de cal.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 67 - Razão entre q_t de 28 dias e q_t de 7 dias para diferentes teores e tipo de cal.

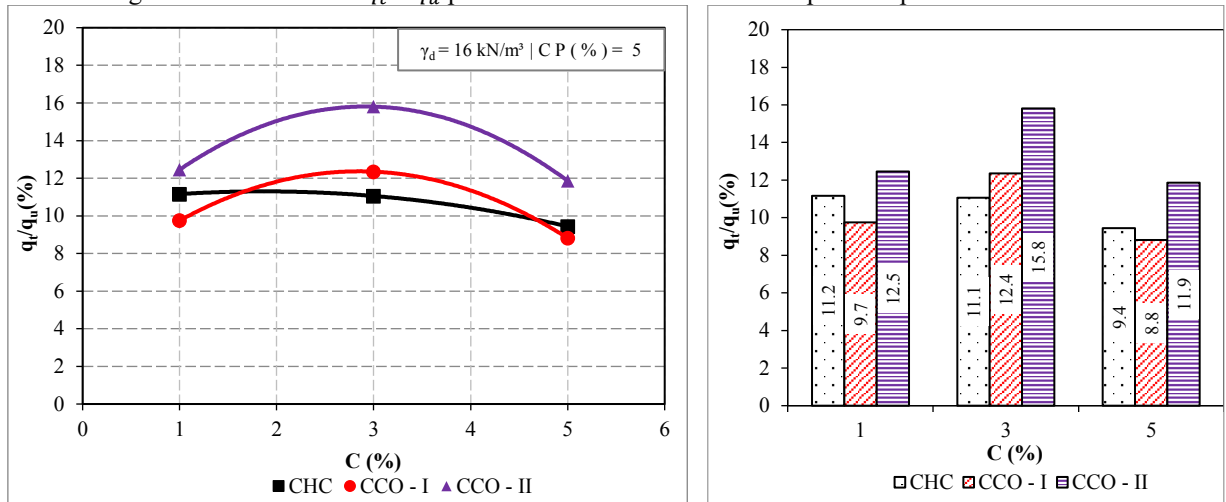
Fonte: Autor, 2023.

As Figura 68 e 69 apresentam a razão q_t/q_u para o tempo de cura de 7 dias e 28 dias das misturas solo-cimento-cal, respectivamente.

Na Figura 68, para misturas com um dado tipo de cal, os maiores valores da razão q_t/q_u ocorreram nas misturas com teor de cal igual a 3%. Em termos gerais, a razão q_t/q_u varia de 8,8% a 15,9%. Especificamente, a faixa de variação de q_t/q_u é de 9,4% a 11,2% para as misturas com CHC, de 8,8% e 12,4% para as misturas com CCO-I e de 11,9% a 15,4% para as misturas com CCO-II.

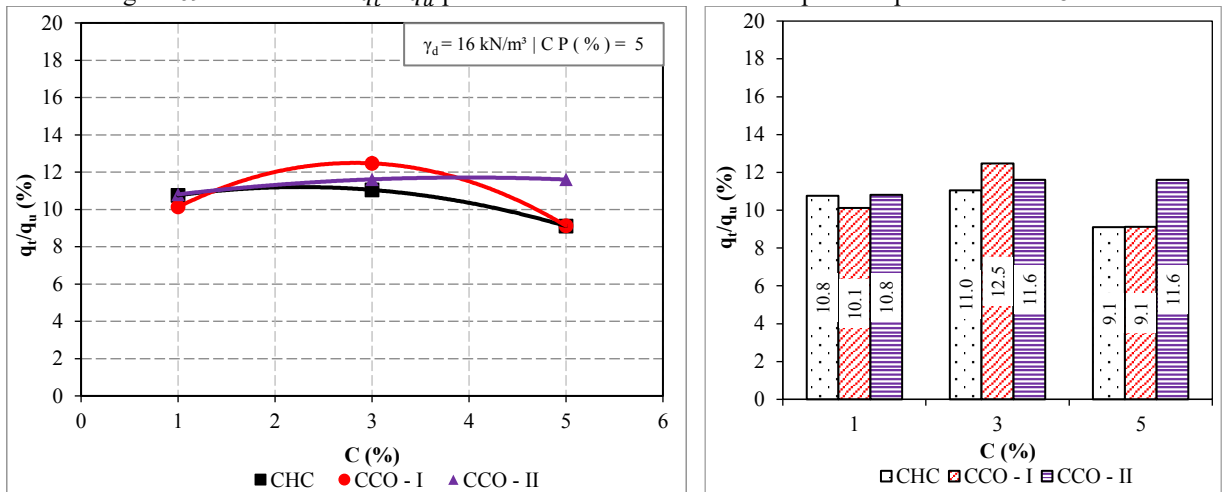
Na Figura 69, a razão q_t/q_u varia de 9,1% a 10,5%. Especificamente, a faixa de variação de q_t/q_u é de 9,1% a 11% para as misturas com CHC, de 9,1% e 12,5% para as misturas com CCO-I e de 10,8% a 11,6% para as misturas com CCO-II. Como destacado anteriormente, os valores da razão q_t/q_u para os tempos de cura de 7 dias e 28 dias estão consistentes com a faixa geralmente apresentada na literatura de 10% a 20% para solos estabilizados com cimento.

Figura 68 - Razão entre q_t e q_u para diferentes teores de cimento para tempo de cura de 7 dias.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 69 - Razão entre q_t e q_u para diferentes teores de cimento para tempo de cura de 28 dias.



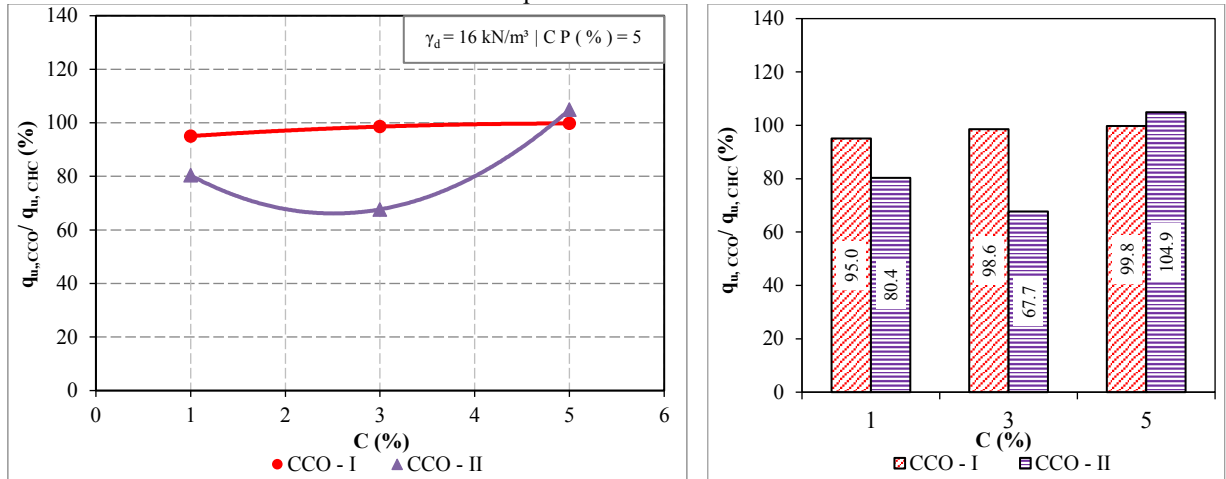
Fonte: Autor, 2023.

Para compreender melhor a influência do tipo de cal na resistência das misturas, a Figura 70 mostra a variação da razão entre q_u das misturas com cales de casca de ovo e q_u das misturas com cal comercial para tempo de cura de 7 dias.

Os valores de q_u das misturas com CCO-I são praticamente idênticas às das misturas com CHC, apresentando uma porcentagem da razão entre as resistências em torno de 100%. Por outro lado, as misturas com CCO-II exibem valores inferiores de q_u em comparação aos valores das misturas com CHC, para teores de cal menores que 5%. Para teores de cales de 3% e 5%, os valores de q_u das misturas com CCO-II são iguais a 80,4% e 67,7%, respectivamente, das resistências das misturas com CHC.

Considerando que as cales de casca de ovo foram processadas no laboratório com menor controle tecnológico do que as cales comerciais, pode-se concluir que a eficiência das misturas com cales de casca de ovo são aceitáveis e apresentam um carácter promissor, principalmente em termos econômicos e ambientais.

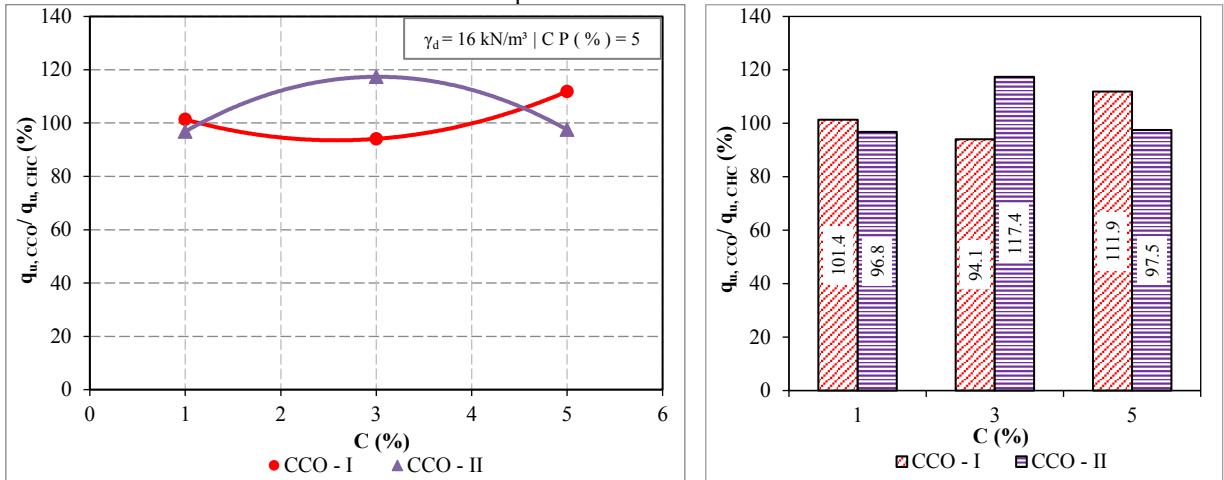
Figura 70 - Relação entre q_u das misturas com cal de casca de ovo e das misturas com cal comercial para um tempo de cura de 7 dias.



Fonte: Autor, 2023

Para o tempo de cura de 28 dias, a Figura 71 mostra a variação da razão entre q_u das misturas com cales de casca de ovo e q_u das misturas com cal comercial. Observa-se que as misturas com cales de casca de ovo tendem a apresentar valores de q_u aproximadamente iguais ou superiores aos das misturas com CHC. Aos 28 dias, as porcentagem da razão entre as resistências, para diferentes teores de cal, varia entre 94,1% e 117,4%. Esses resultados corroboram novamente a conclusão que as cales de casca de ovo apresentam praticamente a mesma eficiência da cal comercial.

Figura 71 - Relação entre q_u das misturas com cal de casca de ovo e das misturas com cal comercial para um tempo de cura de 28 dias.

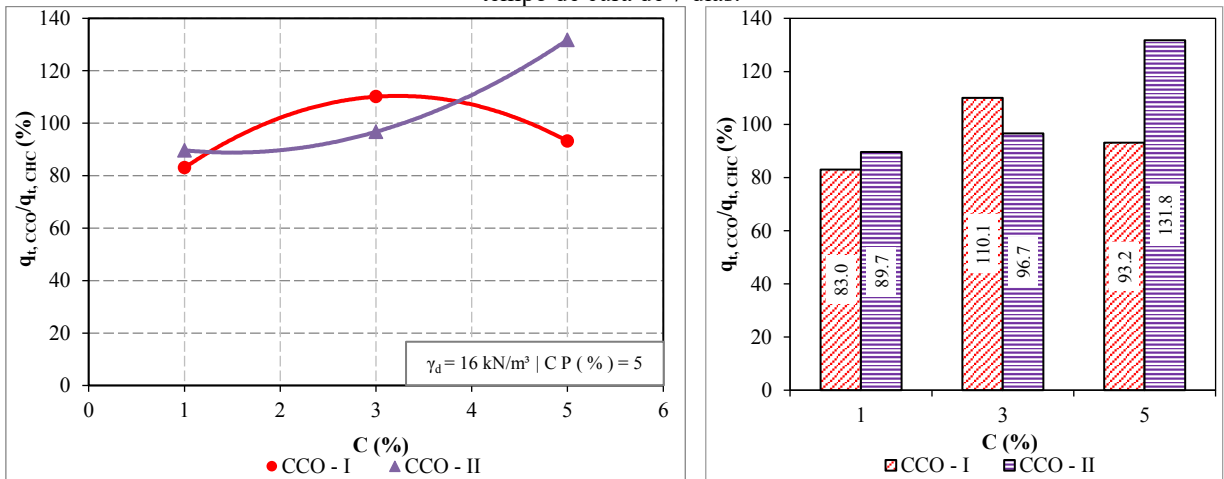


Fonte: Autor, 2023.

A Figura 72 mostra a variação da razão entre q_t das misturas com cales de casca de ovo e q_t das misturas com cal comercial para tempo de cura de 7 dias.

As duas curvas ilustradas na figura exibem comportamentos distintos à medida que o teor de cal aumenta. No entanto, nota-se que os valores de q_t para as misturas com cales de casca de ovo variam de 83% a 131,8% em relação aos valores de q_t das misturas com cal comercial. Para os teores de cal iguais ou superiores a 3%, os valores de q_t para as misturas com cales de casca de ovo excedem 93% dos valores de q_t das misturas com cal comercial. Esses resultados reiteram a eficácia das cales de casca de ovo quando comparadas às de cal comercial.

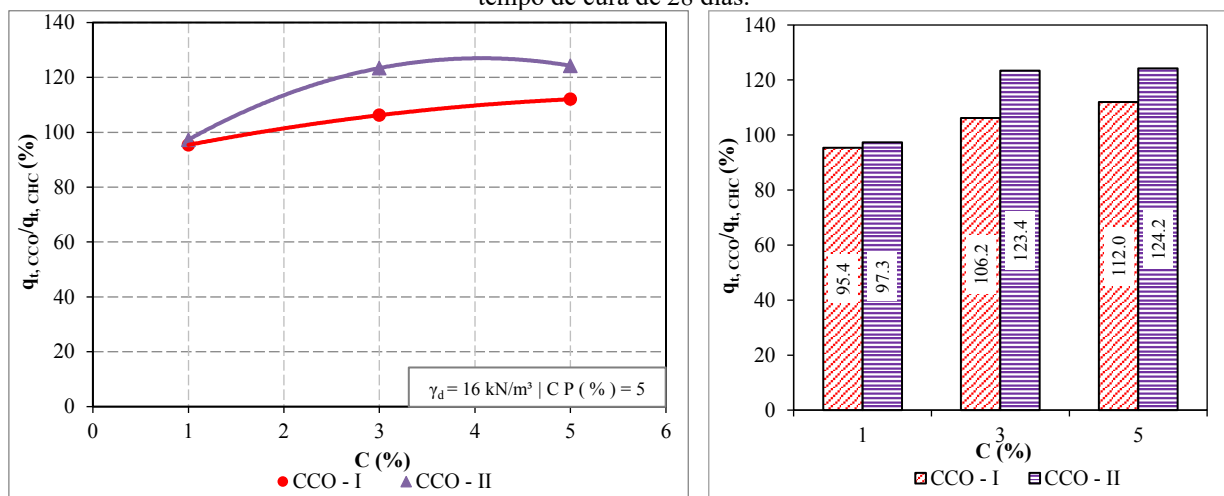
Figura 72 - Relação entre q_t das misturas com cal de casca de ovo e das misturas com cal comercial para um tempo de cura de 7 dias.



Fonte: Autor, 2023.

Para o tempo de cura de 28 dias, a Figura 73 mostra claramente que os valores de q_t para as misturas com cales de casca de ovo variam de 95,4% a 124,2% em relação aos valores de q_t das misturas com cal comercial. Esse resultado também destaca a eficácia das cales de casca de ovo e permite concluir que, ao longo do tempo, o aumento da resistência à compressão diametral nas misturas com cales de casca de ovo supera o aumento da resistência nas misturas com cal comercial.

Figura 73 - Relação entre q_t das misturas com cal de casca de ovo e das misturas com cal comercial para um tempo de cura de 28 dias.



Com o intuito de entender e quantificar a influência das cales na resistência das misturas, as Figuras 74 e 75 apresentam a razão entre q_u das misturas com cales (CP+C) e q_u de solo-cimento sem adição de cal (CP). Ambas as figuras revelam a tendência de redução da razão $q_{u,CP+C}/q_{u,CP}$ com o aumento do teor de cal.

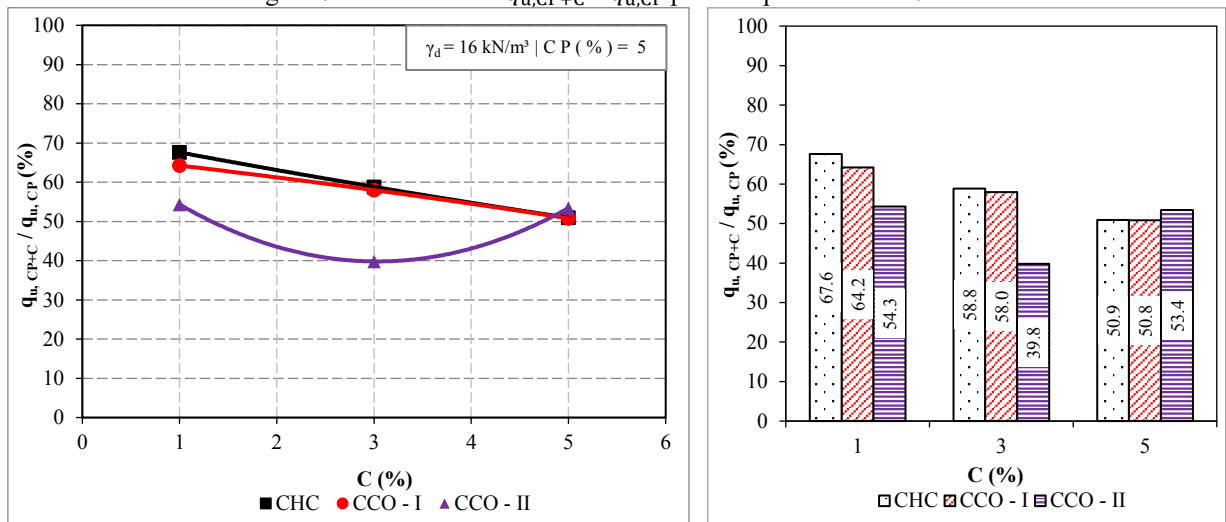
Para o tempo de cura de 7 dias, as misturas com CCO-II apresentaram menores resistências em comparação com as misturas com CHC e CCO-I, que exibiram comportamentos semelhantes. Em todos os casos, a resistência à compressão simples das misturas com cales não ultrapassou 68% da resistência de solo-cimento, indicando uma redução de resistência superior a 32% devido à adição de cal. Para teores de cal entre 1% e 5%, a razão $q_{u,CP+C}/q_{u,CP}$ fica na faixa entre 39,8% e 67,6%.

Para o tempo de cura de 28 dias, as misturas apresentaram comportamentos idênticos, exceto em 3% de cal, onde as misturas com CCO-II exibiram maiores valores da razão $q_{u,CP+C}/q_{u,CP}$. Em todos os casos, a resistência à compressão simples das misturas com

cales não ultrapassou 86,5% da resistência de solo-cimento, indicando uma redução de resistência superior a 13,5% devido à adição de cales. Para teores de cal entre 1% e 5%, a razão $q_{u,CP+C}/q_{u,CP}$ situa-se na faixa entre 60,9% e 86,5%.

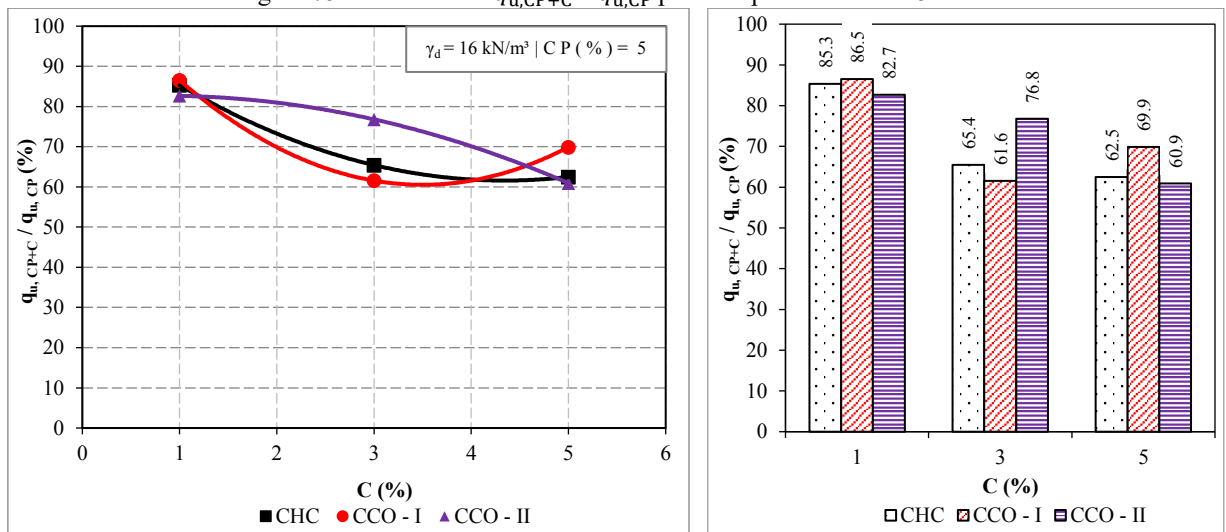
A comparação entre os resultados da resistência à compressão simples de 7 dias e 28 dias permite concluir que a eficácia das misturas com cal aumenta com o tempo, considerando que as cales retardam as reações responsáveis pelo aumento da resistência das misturas. Por esse motivo, é necessário investigar as resistências de misturas com cales para tempos de cura superiores aos considerados nesse trabalho, além de realizar análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Figura 74 – Razão entre $q_{u,CP+C}$ e $q_{u,CP}$ para tempo de cura de 7 dias.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 75 - Razão entre $q_{u,CP+C}$ e $q_{u,CP}$ para tempo de cura de 28 dias..



Fonte: Autor, 2023.

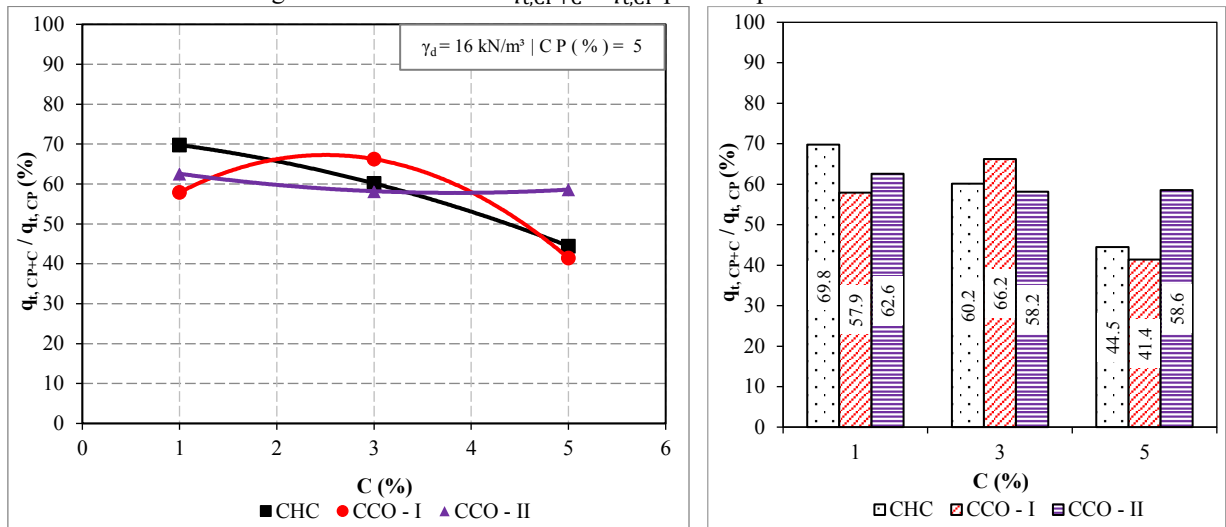
As Figuras 76 e 77 apresentam a razão entre q_t das misturas com cales (CP+C) e q_t de solo-cimento sem adição de cal (CP). Novamente, ambas as figuras revelam a tendência de redução da razão $q_{t,CP+C}/q_{t,CP}$ com o aumento do teor de cal.

Para o tempo de cura de 7 dias, as misturas apresentaram comportamentos idênticos. Em todos os casos, a resistência à compressão diametral das misturas com cales não ultrapassou 70% da resistência de solo-cimento, indicando uma redução de resistência superior a 30% devido à adição de cal. Para teores de cal entre 1% e 5%, a razão $q_{t,CP+C}/q_{t,CP}$ fica na faixa entre 41,4% e 69,8%.

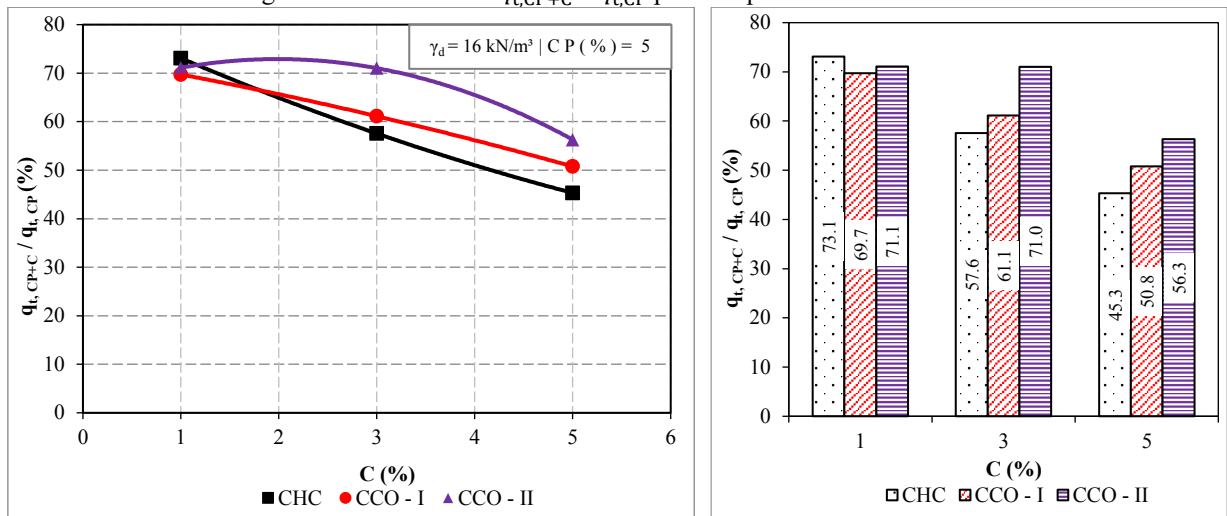
Para o tempo de cura de 28 dias, a resistência à compressão diametral das misturas com cales não ultrapassou 73,1% da resistência de solo-cimento, indicando uma redução de resistência superior a 26,9% devido à adição de cales. Para teores de cal entre 1% e 5%, a razão $q_{t,CP+C}/q_{t,CP}$ situa-se na faixa entre 45,3% e 73,1%.

A comparação entre os resultados da resistência à compressão diametral de 7 dias e 28 dias mostra que a eficácia das misturas com cal aumenta levemente com o tempo.

Figura 76 - Razão entre $q_{t,CP+C}$ e $q_{t,CP}$ para tempo de cura de 7 dias.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 77 - Razão entre $q_{t,CP+C}$ e $q_{t,CP}$ para tempo de cura de 28 dias .

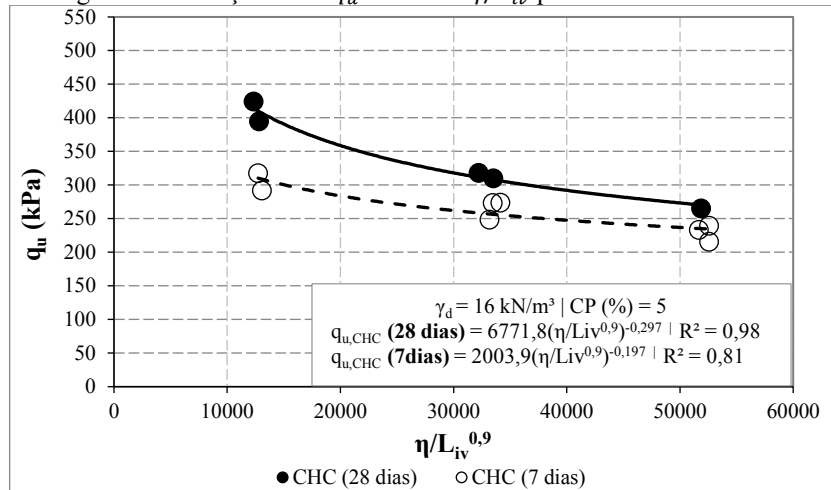
Fonte: Autor, 2023.

Duas formas de normalizações diferentes foram utilizadas para analisar melhor os resultados das misturas solo-cimento-cal. Na primeira abordagem, as resistências à compressão simples e compressão diametral foram relacionadas com a razão entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de cal (L_{iv}), considerando que o teor de cimento é constante e igual a 5%. A segunda forma de normalização relaciona as resistências à compressão simples e diametral com a razão entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de cal e cimento (agente cimentantes) (B_{iv}). Como explicado anteriormente, essas normalizações servem como métodos racionais de dosagem e permitem estimar de forma rápida valores de q_t e q_u em função da porosidade e do teor dos agentes cimentantes.

As Figuras 78 a 80 apresentam a variação de q_u em função da razão η/L_{iv} , enquanto as Figuras 80 a 87 apresentam a variação de q_t em função da razão η/L_{iv} . Os resultados dessas figuras mostram redução de q_u e de q_t com o aumento de η/L_{iv} , como observado nas misturas solo-cimento. Boa correlação é observada entre q_u e η/L_{iv} e entre q_t e η/L_{iv} , evidenciada pelos elevados valores do coeficiente de determinação (R^2).

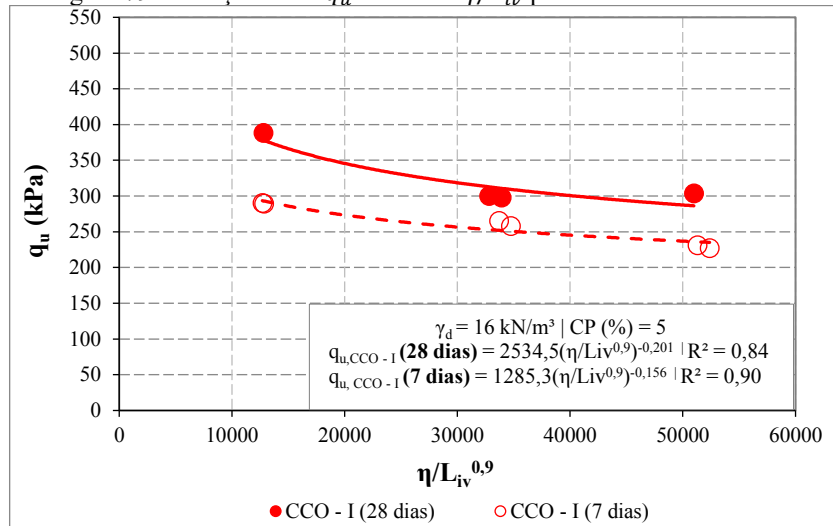
Vale ressaltar que a forma potencial se ajusta melhor aos resultados das misturas com cal hidratada comercial (CHC) e cal de casca de ovo I (CCO-I), enquanto a forma linear proporciona um ajuste mais adequado aos resultados das misturas com cal de casca de ovo II (CCO-II). Para todas as misturas e tempos de cura, o coeficiente k igual a 0,9 proporciona o melhor ajuste das curvas. Considerando que o valor do coeficiente k é inferior a 1, conclui-se que o efeito da porosidade é mais significativo do que o do teor volumétrico de cal.

Figura 78 - Relação entre q_u e a razão η/L_{iv} para misturas com CHC.



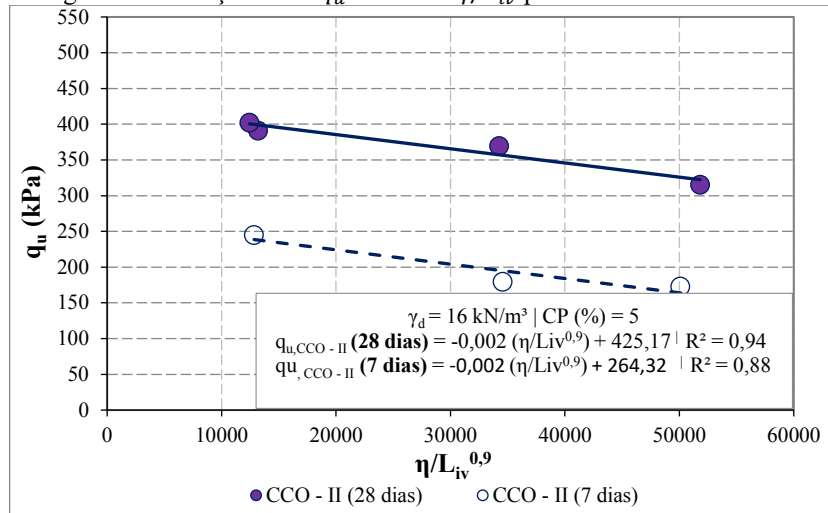
Fonte: Autor, 2023.

Figura 79 - Relação entre q_u e a razão η/L_{iv} para misturas com CCO-I.



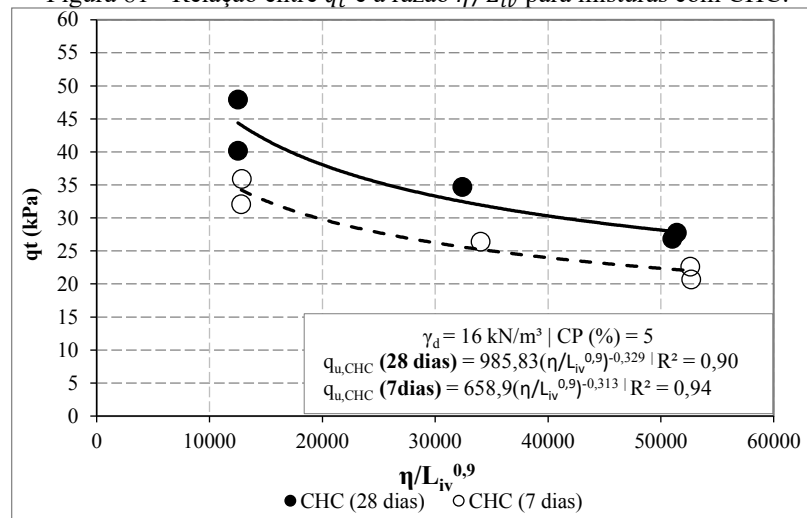
Fonte: Autor, 2023.

Figura 80 - Relação entre q_u e a razão η/L_{iv} para misturas com CCO-II.

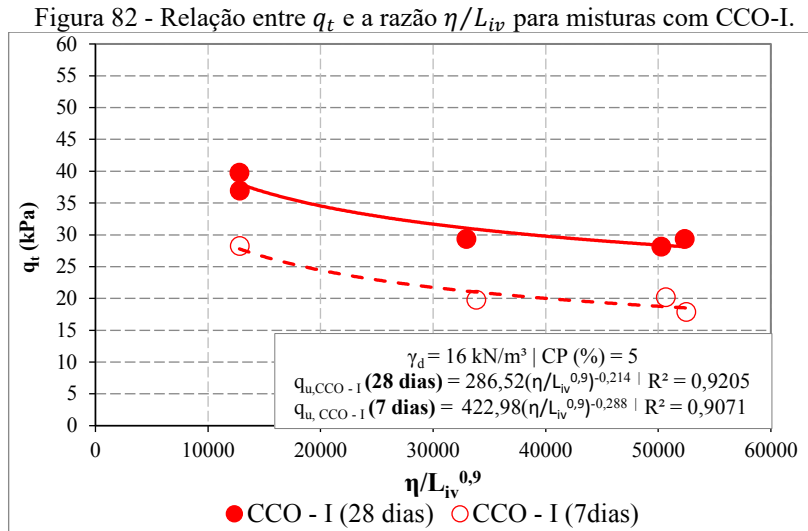


Fonte: Autor, 2023.

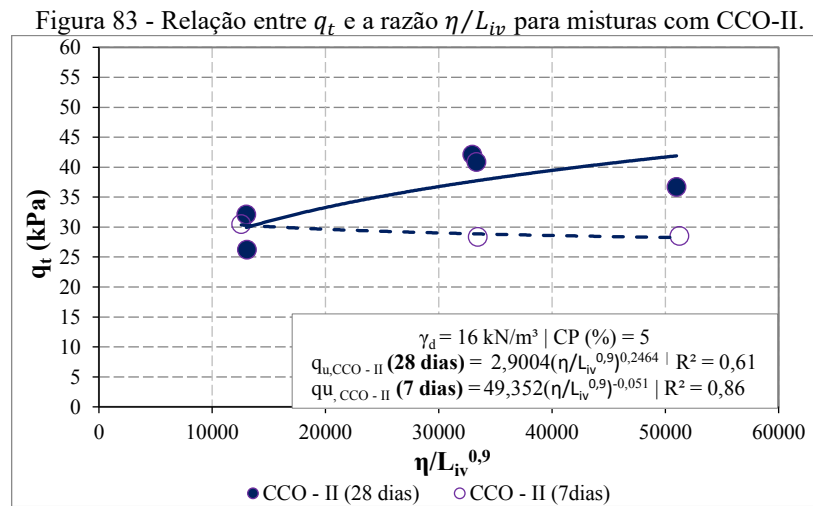
Figura 81 - Relação entre q_t e a razão η/L_{iv} para misturas com CHC.



Fonte: Autor, 2023.



Fonte: Autor, 2023.



Fonte: Autor, 2023.

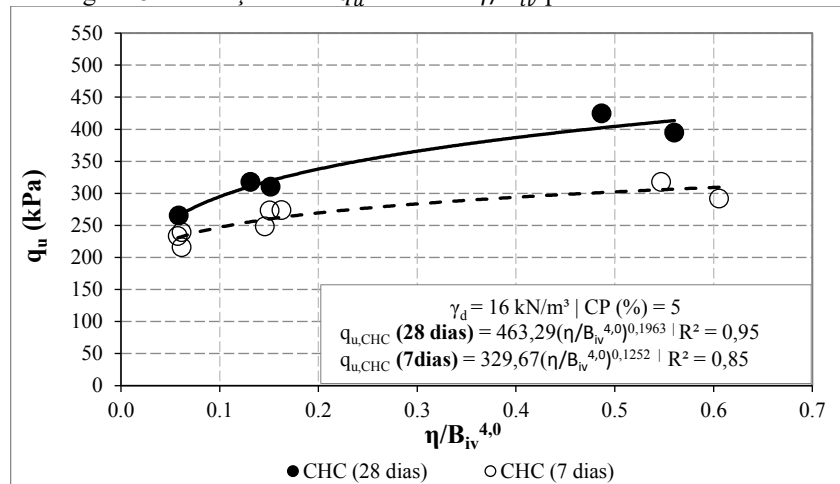
As Figuras 84 a 86 apresentam a variação de q_u em função da razão η/B_{iv} , enquanto as Figuras 87 a 89 apresentam a variação de q_t em função da razão η/B_{iv} . Diferente do comportamento observado na normalização anterior com η/L_{iv} , os resultados dessas figuras mostram o aumento de q_u e de q_t com o aumento de η/B_{iv} . No entanto, observa-se também uma boa correlação entre q_u e η/B_{iv} e entre q_t e η/B_{iv} , evidenciada pelos elevados valores do coeficiente de determinação (R^2).

A forma potencial se ajusta melhor a todos os resultados de q_u e aos resultados de q_t das misturas com cal hidratada comercial (CHC). A forma linear proporciona um ajuste mais adequado aos resultados de q_t das misturas com cal de casca de ovo (CCO-I e CCO-II). Para todas as misturas e tempos de cura, o coeficiente k que proporciona o melhor ajuste das

curvas é igual a 4. Considerando que o valor do coeficiente k é superior a 1 na segunda forma de normalização, conclui-se que o efeito da porosidade é menos significativo do que o do teor volumétrico de cal e cimento.

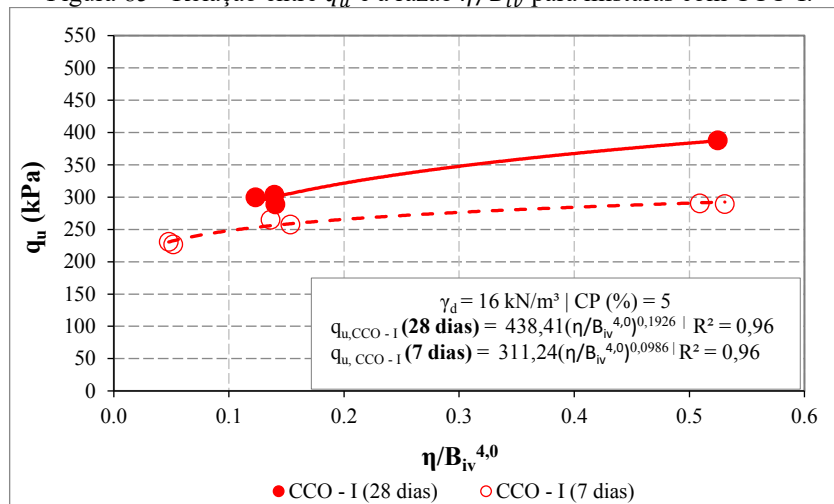
Por fim, é importante destacar que ambas as formas de normalização podem ser consideradas excelentes alternativas de dosagem quando se busca alcançar uma resistência à compressão específica, por meio da modificação adequada dos valores de η , L_{iv} e B_{iv} .

Figura 84 - Relação entre q_u e a razão η/B_{iv} para misturas com CHC.



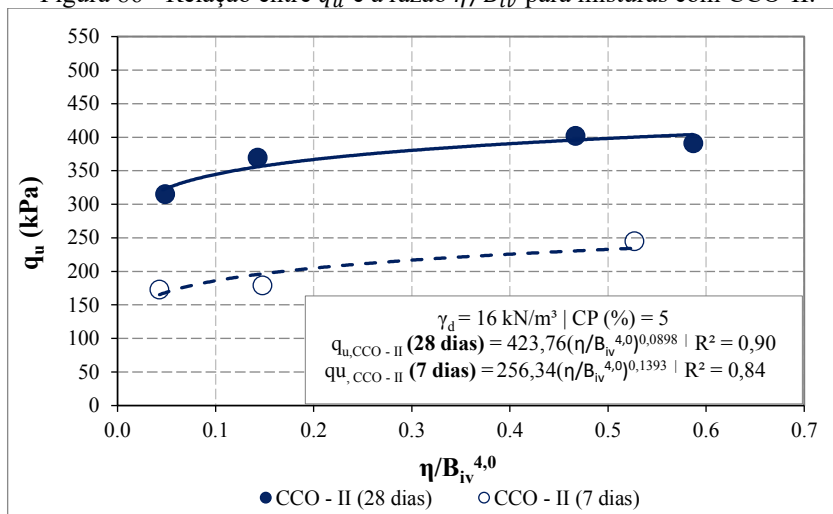
Fonte: Autor, 2023.

Figura 85 - Relação entre q_u e a razão η/B_{iv} para misturas com CCO-I.



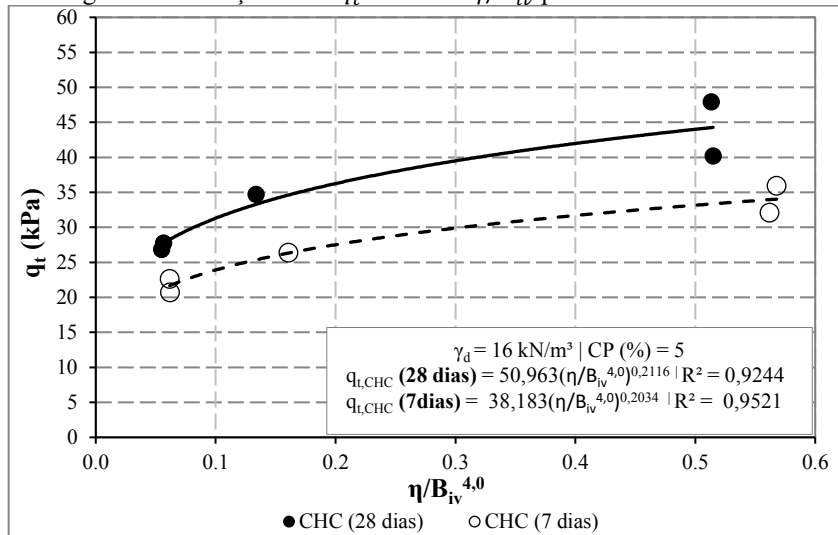
Fonte: Autor, 2023.

Figura 86 - Relação entre q_u e a razão η/B_{iv} para misturas com CCO-II.



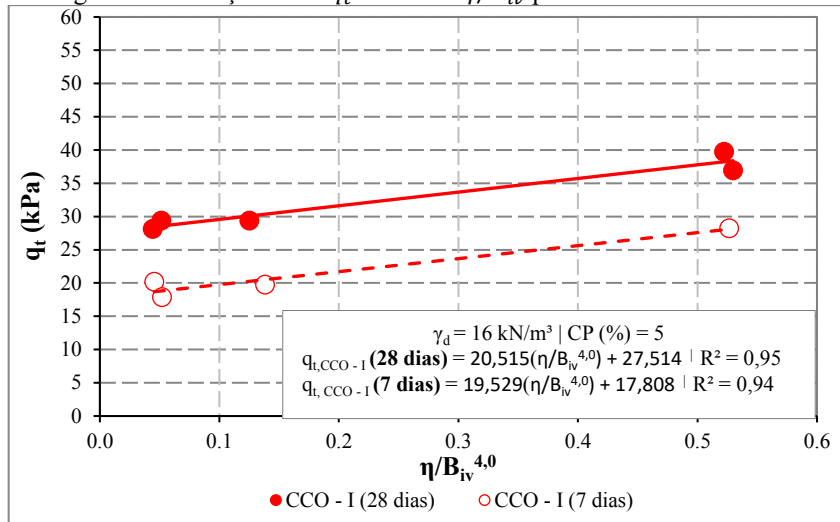
Fonte: Autor, 2023.

Figura 87 - Relação entre q_t e a razão η/B_{iv} para misturas com CHC.



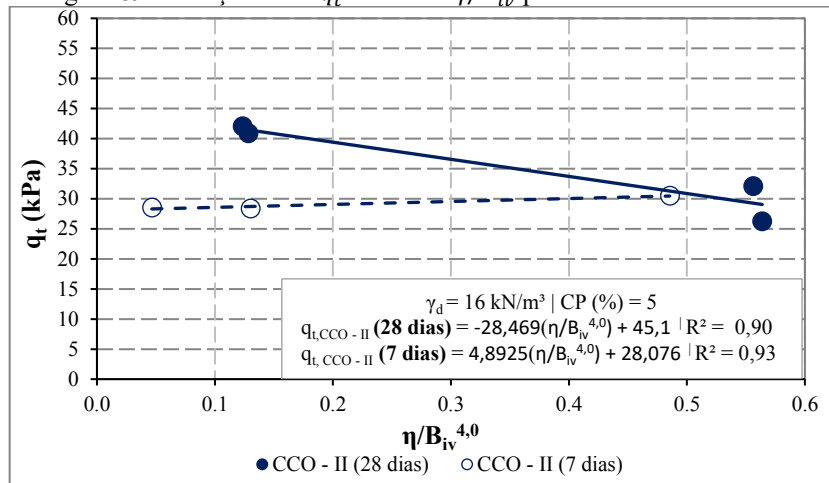
Fonte: Autor, 2023.

Figura 88 - Relação entre q_t e a razão η/B_{iv} para misturas com CCO-I.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 89 - Relação entre q_t e a razão η/B_{iv} para misturas com CCO-II.



Fonte: Autor, 2023.

5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar os comportamentos físico-mecânicos de um solo arenoso estabilizado utilizando cimento Portland, cal hidráulica comercial e cal produzida no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC a partir de resíduos de casca de ovo. A partir dos resultados obtidos, são estabelecidas e apresentadas as seguintes conclusões:

- O solo em estudo é predominantemente arenoso, composto por partículas de quartzo, sendo classificado como não plástico, uniforme e mal graduado. Seu peso específico seco máximo e a umidade ótima são iguais a 16,35 kN/m³ e 16,9 %, respectivamente;
- O pH do solo sem a adição de agente cimentante é de 9,53. Com a adição de teores de cimento entre 3% e 7%, observa-se um aumento substancial, variando de 11,94 a 12,14. Para misturas que contêm 5% de cimento e teor de cal entre 1%, 3% e 5%, o pH permanece em torno de 12,44, com pouca influência do tempo de hidratação;
- Análises químicas por meio de difração de raios-X indicam a predominância de quartzo (SiO₂) na areia e de óxido de cálcio (CaO) no cimento e nas cales;
- As resistências à compressão simples (q_u) e compressão diametral (q_t) aumentam consideravelmente com o aumento do teor de cimento, do peso específico seco e do tempo de cura. Contudo, para todas as combinações de mistura, os valores de q_u são inferiores à 2,1 MPa recomendados para solos estabilizados;
- Expressões propostas para estimar as resistências a partir da razão de porosidade (η) e do teor de cimento (C_{iv}) demonstram boas correlações e podem ser utilizadas como métodos racionais de dosagem para misturas similares;
- A adição de cal tende a diminuir as resistências, independentemente do tempo de cura, indicando possíveis efeitos negativos nas reações pozolânicas nos tempos analisados. Análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) são recomendadas para uma compreensão mais aprofundada da evolução de cimentação ao longo do tempo;
- Tanto para misturas solo-cimento quanto solo-cimento-cal, os valores da razão q_t/q_u estão dentro da faixa de 10% a 20% apresentada na literatura para solos estabilizados com cimento.
- As misturas com cal de casca de ovo apresentam resistências superiores em comparação às das misturas com cal comercial, dependendo do teor de cal, sugerindo um carácter promissor para utilização de cales de casca de ovo, principalmente em termos econômicos e ambientais.

- Ambas as formas de normalização são excelentes para dosar misturas solo-cimento-cal, visando resistências específicas, mediante ajustes nos valores de η , L_{iv} e B_{iv} . Em todas as misturas e tempos de cura, o coeficiente $k = 0,9$ ajusta melhor as curvas normalizadas de q_t e q_u em função de L_{iv} , indicando maior impacto da porosidade do que do teor volumétrico de cal. Por outro lado, o coeficiente $k = 4$ ajusta melhor as curvas normalizadas de q_t e q_u em função de B_{iv} , sugerindo que o efeito da porosidade é menos significativo do que do teor volumétrico de cal e cimento.
- Os procedimentos laboratoriais para a produção de cal a partir de cascas de ovos são eficientes e facilmente replicáveis;

Para futuras pesquisas nesta área, as seguintes recomendações são sugeridas:

- Realizar análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para investigar a evolução da cimentação ao longo do tempo;
- Analisar comportamentos de misturas solo-cimento-cal para maiores temperaturas e tempos de cura;
- Avaliar a durabilidade de solos arenosos estabilizados com cal obtida a partir de casca de ovo.

6 REFERÊNCIAS

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Report on Soil Cement: ACI 230.1R-09.** Farmington Hills: ACI, 2009. 28 p.

ABPA, ABPA Relatório Anual. **Associação brasileira de proteína animal.** 2021.

ACOSTA, Cindy Johanna Moncaleano. **Melhoramento de um solo granular por ativação alcalina de resíduos de vidro e cal de casca de ovo.** 2021. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ALMEIDA, Eva Clícia de Jesus et al. **Características físicas de ovos de galinhas nativas comparadas a linhagem de postura.** Arquivos de Zootecnia, v. 68, n. 261, p. 82-87, 2019.

AL-SAFY R., **experimental investigation on properties of cement mortar incorporating eggshell powder,** Journal of Engineering and Development, Vol. 19, No. 06, noviembre (2015).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253: Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento.** 2012b.

_____. **NBR 11798: Materiais para base de solo-cimento - Requisitos** , 2012a.

_____. **NBR 12024: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos,** 2012.

_____. **NBR 12253: Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento – Procedimento** , 2012

_____. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos,** 2018.

_____. **NBR 6471: Cal virgem e cal hidratada – Retirada e preparação da amostra - Procedimento** , 1998.

_____. **NBR 7175: Cal hidratada para argamassas – Requisitos** , 2023.

_____. **NBR 7181: Análise granulométrica,** 2016.

_____. **NBR 7182: Ensaio de Compactação,** 2016.

_____. **NBR NM8 DE 01/1994 Concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral.**

AZEVÊDO, André Luis Cairo. **Estabilização de solos com adição de cal: um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem após a adição de cal.** 2010. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

BALAMURUGAN, M.; SANTHOSH, R. Influence of egg shell ash on the properties of cement. **Imperial Journal of Interdisciplinary Research**, v. 3, n. 4, p. 160-165, 2017.

BECK, K, X. Brunetaud, J. D. Mertz, and M. Al-Mukhtar. 2010. “**On the use of eggshell lime and tuffeau powder to formulate an appropriate mortar for restoration purposes.**” *Geol. Soc. Spec. Publ.* 331 (1): 137–145. <https://doi.org/10.1144/SP331.12>.

Bensaifi, E., F. Bouteljda, M. S. P. NouaoriaBreul, and P. Breul. 2019. “**Influence of crushed granulated blast furnace slag and calcined eggshell waste on mechanical properties of a compacted marl.**” *Transp. Geotech.* 20 (1): 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100244>.

BERALDO, Antonio Ludovico; NAGUMO, César Hideo. Compósito casca de ovo e argamassa de cimento Portland. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 2004, Florianópolis.

BERGADO, D. T.; ANDERSON, L. R.; MUIRA, N.; BALASUBRAMANIAM, A. S. **Soft ground improvement:** In Lowland and Other Environments. New Work: American Society of Civil Engineers, 1996.

CASTAÑEDA, María Teresita; STECHINA, Damián E. Alternativa ecoeficiente para el aprovechamiento de cáscara de huevo, residuo derivado de la industria de ovoproductos. In: **XIV Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos (CYTAL)(Rosario, 23 al 25 de octubre de 2013)**. 2013.

CASTRO, F. J. C. O. **Contribuição ao conhecimento e à determinação da reatividade de solos sesquixídicos utilizando o hidróxido de cálcio:** aplicação ao processo de geopolimerização (estabilização). 1995. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Reio de Janeiro.

CONSOLI, N. C.; DA SILVA, A. P.; NIERWINSKI, H. P.; SOSNOSKI, J. **Durability, strength and stiffness of compacted gold tailings-cement mixes.** *Canadian Geotechnical Journal*, v. 55(10), p. 486 – 494, 2017a.

CONSOLI, N. C.; DA SILVA, J. K.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; RIVOIRE, A. B. **Compacted clay-industrial wastes blends: long term performance under extreme freeze-thaw and wet-dry conditions.** *Applied Clay Science*, v. 146, p. 404 – 410, 2017b.

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.; 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.; TOMASI, L. F. **The impact of dry unit weight and cement content on the durability of sand–cement blends.** Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Ground Improvement, v. 171(2), p. 96 – 102, 2018.

CONSOLI, N. C.; WINTER, D.; LEON, H. N.; SCHEUERMANN FILHO, H. C. **Durability, strength and stiffness of green stabilized sand.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 144(9), p. 1 – 10, 2018.

CONSOLI, Nilo Cesar et al. Produção de cal de casca de ovo: Inovação para solos estabilizados. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 11, p. 06020018, 2020.

CONSTANTINO, Camila de Souza. **Estabilização de um solo expansivo do município de Paulista com uso de cinza de casca de arroz.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.

COUTINHO, A. de S. **Fabrico e Propriedades do Betão.** Lisboa: LNEC, 1973. 610 p.

CRISTELO, Nuno. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal.** 2001. Tese de Doutorado.

CROFT, J. B. The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization. **Geotechnique**, v. 17, n. 2, p. 119-135, 1967.

D6276 - 19 : Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization

DIAMBRA, A.; IBRAIM, E.; CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L. **Theoretical derivation of artificially cemented granular soil strength.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 143(5), p. 1 – 9, 2017

DORNELLES, Lucas Eduardo. **Comportamento mecânico de um solo argiloso estabilizado com pó de vidro, cal de carbureto e hidróxido de sódio.** 2020. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

FAZZERA U. Kamaran Ali and Zarina Yasmin, "**Viability of Egg Shell Ash Affecting The Setting Time of Cement**", Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering, Vol 10, March 2016.

FERNANDEZ, M.; ARIAS J. L. **La cascara del huevo: un modelo de biomineralizacion.** Monografias de Medicina Veterinaria. Santiago de Chile (2000).

FERRAZ, E., J. A. F. Gamelas, J. Coroado, C. Monteiro, and F. Rocha. 2018. **“Eggshell waste to produce building lime: Calcium oxide reactivity, industrial, environmental and economic implications.”** Mater. Struct. 51 (155): 1–14. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1243-7>.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FRANCIS, A. & RAHMAN, M. **The environmental sustainability of calcined calcium phosphates production from the milling of eggshell wastes and phosphoric acid.** Journal of Cleaner Production. 2016.

GOMEZ F.; FRIAS S.; BRAVO V.; PACHECO C. **Use of Egg-shell powder as partial replacement of cementitious material in mortar cubes of hydraulic cement.** Investigation formative en ingenieria. 2019.

HASSAN, B. H., **Eggshell as an additive in concrete mix**, Faculty of Civil Engineering and Earth Resources UNIVERSITI MALAYSIA PAHANG, junho, (2014).

HERRIN, M; MITCHELL, H. Lime soil mixture. **Highway Research Board**, 304, p. 99 - 138, 1961.

HERZOG, A.; MITCHELL, J. K. **Reactions accompanying stabilization of clay with cement.** Highway Research Record, 36, p. 146-171, 1963.

HILT, G. Harrison; DAVIDSON, D. T. Lime fixation in clayey soils. **Highway Research Board Bulletin**, n. 262, 1960.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization: principle and practice.** Melbourne: Butterworths, 1972.

JOHANN, A. D. R. **Metodologias para a previsão do comportamento mecânico e para a análise da variação da porosidade de um solo siltoso tratado com cal em diferentes tempos de cura.** 2013. 272 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de PósGraduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

JÚNIOR, Gilberto Regalin; NIENOV, Fabiano Alexandre. Incorporação de pó de casca de ovo de galinha em misturas de solo-cimento. **Conhecimento em Construção**, v. 9, p. 221-242, 2022.

KOSMATKA, S.H.; KERKHOFF, B. & PANARESE, W.C. **Design and control of concrete mixtures**. EB001. Portland Cement Association PCA. 14. Illinois: Skokie, 2002. 372 p.

LARNACH, W. J. **Relationship between dry density, voids/cement ratio and strength of soil-cement mixtures**. Civil Engineering and Public Works Reviews. London: Lomax Erskine and Co., vol.55, n.648, p.903-905, 1960.

LITTLE, D. N.; THOMPSON, M. R.; TERRELL, R. L.; EPPS, J. A.; BARENBERG, E. J. **Soil stabilization for roadways and airfields**: Report ESL-TR-86-19. Air Force Engineering and Services Center, 1987. 340 p.

LOPES JÚNIOR, Luizmar da Silva. **Metodologia de previsão do comportamento mecânico de solos tratados com cal**. 2011.

MALLELA, Jagannath; QUINTUS, H. Von; SMITH, K. Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design. **The National Lime Association**, v. 200, n. 1, p. 1-40, 2004.

MAURY, M. B. et al. Cement production: impacts on health and the environment. **Sustentabilidade em Debate**, v. 3, n. 1, p. 75-95, 2012.

MINDESS, S. YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete**. New Jersey: Pearson Education, 2003.

MOH, Z. C. **Reactions of Soil Minerals with Cement and Chemicals**. Highway Research Record, Washington, O. C. 6a: 39-61, 1965.

MTALLIB, Musa Osiregbhemhe Abdul; RABIU, A. Effects of eggshells ash (ESA) on the setting time of cement. **Nigerian Journal of Technology**, v. 28, n. 2, p. 29-38, 2009.

NAIDU, K. et al. Experimental study on M30 grade concrete with partial replacement of cement with egg shell powder. **International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), India**, v. 9, n. 5, p. 575-583, 2018.

NEVES, M. A., **Alternativas para valorização da casca de ovo como complemento alimentar e em implantes ósseos**. Dissertação de Mestrado em Ciência dos Alimentos.

Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 1998.

NUNEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação.** 1991. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

OKONKWO, Ugochukwu N.; ODIONG, Inyeneobong Cletus; AKPABIO, E. E. **The effects of eggshell ash on strength properties of cement-stabilized lateritic.** International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology, v. 3, p. 18-25, 2012.

PAIXÃO, Julia Klipel. Ligante Álcali-Ativado De Cinza De Casca De Arroz E Cal De Casca De Ovo Aplicado No Melhoramento De Solo Residual De Basalto. CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA. UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL CAMPUS ERECHIM, 2022.

PRUSINSKI, Jan R.; BHATTACHARJA, Sankar. Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils. **Transportation research record**, v. 1652, n. 1, p. 215-227, 1999.

ROBNETT, Quentin Laverne; THOMPSON, Marshall R. **Stabilization of Illinois Materials-development of Guidelines and Criteria.** University of Illinois, 1969.

ROGERS, C.D.F; GLENDINNING, S; ROOF, T.E.J. **Lime Modification of Clay Soils for Construction Expediency.** Geotechnical Engineering, v. 125, p 242-249, Londres, 1997.

ROGERS, Christopher DF; GLENDINNING, Stephanie. Lime requirement for stabilization. **Transportation research record**, v. 1721, n. 1, p. 9-18, 2000.

SALDANHA, Rodrigo Beck et al. Physical-mineralogical-chemical characterization of carbide lime: An environment-friendly chemical additive for soil stabilization. **J. Mater. Civ. Eng**, v. 30, n. 6, p. 06018004, 2018.

SENÇO, W. de. **Manual de Técnicas de Pavimentação:** v. 2. São Paulo: Pini, 2001. 672 p.

THOMÉ, A. **Estudo do comportamento de um solo mole tratado com cal, visando seu uso em fundações superficiais.** 1994. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

THOMPSON, M. R. Lime reactivity of Illinois soil. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division.** V. 92, N. SM5, pp 67-92. Reston, US:1966.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais.** 2003. 247 f. Tese

(Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

WINTON, A. L.; “**Poultry Eggs**”, Agrobios Publishers, Behind Nasrani Cinema, India, 2003.

YERRAMALA, Amarnath. Properties of concrete with eggshell powder as cement replacement. **The Indian concrete journal**, v. 88, n. 10, p. 94-105, 2014.