

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

LUCAS MARIN MALABARBA

**EFEITO DO TEOR E DO TIPO DE CAL NA ESTABILIZAÇÃO
DE DOIS SOLOS TROPICAIS**

Porto Alegre
Novembro de 2021

LUCAS MARIN MALABARBA

**EFEITO DO TEOR E DO TIPO DE CAL NA ESTABILIZAÇÃO
DE DOIS SOLOS TROPICAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Washington Peres Núñez

Coorientadora: Thaís Radünz Kleinert

Porto Alegre

Novembro de 2021

LUCAS MARIN MALABARBA

**EFEITO DO TEOR E DO TIPO DE CAL NA ESTABILIZAÇÃO DE DOIS SOLOS
TROPICAIS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo Professor Orientador, pela Professora Coorientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, novembro de 2021

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. pelo PPGEC/UFRGS, Brasil
Orientador

Prof.^a. Thaís Radünz Kleinert
Dra. pelo PPGCI/UFRGS, Brasil
Coorientadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Washington Peres Núñez

Dr. pelo PPGEC/UFRGS, Brasil

Prof.^a. Thaís Radünz Kleinert

Dra. pelo PPGCI/UFRGS, Brasil

Prof. Matheus Ferreira Matuella

Me. pelo PPGEC/UFRGS, Brasil

Prof.^a. Camila Kern

Ma. pelo PPGEC/UFRGS, Brasil

Dedico este trabalho à minha família, que sempre me ajudou
e me apoiou para que eu pudesse realizar meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Desejo agradecer a todos que de alguma forma fizeram parte dessa trajetória acadêmica e possibilitaram a realização deste trabalho.

Agradeço ao meu pai Arlindo Malabarba, minha mãe Dolores Marin Malabarba e meu irmão Édipo Marin Malabarba por todo o apoio e compreensão que tiveram durante esses anos de graduação. Me ensinaram a importância dos estudos e sempre me incentivaram a buscar meus sonhos.

Agradeço a Angelica Zuchi Lucca por fazer parte da minha vida nesses últimos 10 anos, ficando ao meu lado nos momentos difíceis e me fazendo ser uma pessoa melhor a cada dia.

Quero agradecer também o William Fedrigo, Matheus Matuella, Camila Kern e Bruna Diniz por todos os ensinamentos que foram me passados durante esses anos de convívio e por terem me deixado participar de suas pesquisas. Profissionais que me orgulho de ter conhecido e feito parte de suas histórias.

Deixo aqui meu muito obrigado a Thaís Kleinert pela paciência e por todo o cuidado que teve no auxílio desse trabalho.

Agradeço ao professor Washington Peres Núñez que me orientou neste trabalho com muita atenção e carinho.

Por fim, quero agradecer a todos os funcionários e colaboradores do Laboratório de Geotecnologia (LAGEOtec) e do Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da UFRGS, que disponibilizaram espaço e tempo para que fosse possível a realização deste trabalho.

RESUMO

A estabilização de solos com adição de cal é uma técnica utilizada para melhorar as propriedades dos materiais que não apresentam as características necessárias para receberem as solicitações. Em fundações e rodovias, por exemplo, a técnica pode aumentar a resistência do solo de modo que este atinja o desempenho solicitado pela obra de engenharia. A técnica é utilizada universalmente há anos, porém a maioria das informações técnicas refere-se a solos de clima temperado, de modo que são necessários estudos acerca da aptidão da técnica em solos tropicais. Desta forma, este trabalho é um estudo sobre o efeito da adição de dois tipos de cales na estabilização de dois solos tropicais. Foi proposto a utilização da cal calcítica e da cal dolomítica nos teores de 3% e 5% como agentes estabilizantes em dois solos, sendo eles um Latossolo Vermelho proveniente do estado do Paraná e um Argissolo Vermelho proveniente do estado do Rio Grande do Sul. Para análise do efeito da adição de cal nos solos, foram moldados na energia modificada corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm os quais foram ensaiados à resistência à compressão simples e submetidos a ciclos de secagem e molhagem. Os resultados mostraram aumento da resistência das misturas com cal calcítica para ambos os solos, e um aumento na resistência apenas do Latossolo Vermelho com a adição da cal dolomítica. Em relação à durabilidade, o aumento do teor de cal calcítica no Latossolo Vermelho, melhorou a durabilidade da mistura, já para o Argissolo vermelho, foi o aumento do teor de cal dolomítica que resultou em uma melhora na durabilidade da mistura. Houve também aumento da resistência da maioria dos corpos de prova com a adição das cales, sendo que apenas a mistura de Argissolo Vermelho com 5% cal dolomítica apresentou um decréscimo de sua resistência.

Palavras-chaves: Cal, solo tropical, resistência, durabilidade, estabilização

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CaO – óxidos de cálcio

CaOH₂ – hidróxido de cálcio

CC – Cal calcítica

CD – Cal dolomítica

CP – Corpo de prova

GC – Grau de compactação

LPAV – Laboratório de Pavimentação da UFRGS

LV – Latossolo Vermelho

MgO - óxido de magnésio

MgOH₂ - hidróxido de magnésio

PV – Argissolo Vermelho

RCS – Resistência à compressão simples

SiBCS – Sistema brasileiro de classificação de solos

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

$\omega_{ót}$ – Teor de umidade ótimo

$\gamma_{dmáx}$ – massa específica aparente seca máxima

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Solos tropicais e reação com cal.....	6
2.2	Tipo de cales e suas propriedades.....	7
2.3	Estabilização Solo-Cal	8
3	MATERIAIS E MÉTODOS	9
3.1	Solos.....	9
3.2	Cales.....	10
3.3	Dosagem e caracterização das misturas solo-cal.....	12
3.4	Ensaio de resistência à compressão simples	15
3.5	Ensaio de Durabilidade	16
4	RESULTADOS	17
4.1	Latossolo Vermelho	17
4.2	Argissolo Vermelho	20
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	24
6	REFERÊNCIAS	26

1 INTRODUÇÃO

Em obras de engenharia, o solo presente na construção tem importância fundamental para o desempenho da estrutura. Em pavimentos e em fundações, o solo tem como objetivo dispersar e absorver tensões provenientes de carregamentos em suas estruturas, contudo o solo presente no local pode não comportar os esforços solicitantes. Algumas técnicas podem ser utilizadas, como realizar a troca do material do local por outro com propriedades mais adequadas, no entanto, essa opção acaba muitas vezes sendo economicamente inviável, além de não ser muito indicada levando em consideração os impactos ambientais com o descarte do material e a exploração de uma nova jazida. Outra técnica que pode ser implementada para melhorar o comportamento do solo e seu desempenho, é a adição de substâncias estabilizantes como cal e do cimento Portland. Neste trabalho, são abordados estudos referentes a utilização de cal, que já vem sendo utilizada no Brasil com a finalidade de melhorar as propriedades do solo, embora a técnica ainda seja pouco divulgada nos meios técnicos. A cal, em comparação com o cimento, é proporcionalmente mais barata e de fácil acesso. Por isso, este trabalho tem como objetivo estudar o efeito do teor e do tipo de cal na estabilização de dois solos tropicais, verificando a resistência das misturas e a durabilidade do material em contato com a água.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Solos tropicais e reação com cal

Segundo Nogami e Villibor (1995) solos tropicais são aqueles que apresentam características e propriedades de processos geológicos de regiões tropicais. Esses podem ser divididos em dois grupos: solos lateríticos e solos saprolíticos.

Os autores explicam que os solos lateríticos são de regiões bem intemperizadas e drenadas, ocupando camadas mais superficiais do terreno, com coloração predominantemente vermelha e amarela. Na fração argila, é constituído de argilominerais como a caulinita, além de alumínio, óxidos e hidróxido de ferro; na fração areia apresenta quartzo e outros minerais como a turmalina, zircão e magnetita (NOGAMI e VILLIBOR, 1993).

Castro (1995) observou que a adição de cal em um solo fino na presença da água pode gerar reações químicas rápidas que levam horas ou dias e reações químicas lentas podendo levar meses ou anos. O autor explica que na fase rápida podem ocorrer troca catiônica, floculação-

aglomeração e outras reações químicas; na fase lenta ocorrem reações pozolânicas, formando produtos cimentantes e também a carbonatação, que é uma reação prejudicial à mistura.

Segundo Prusinski e Bhattacharja (1999) as superfícies dos argilominerais são deficientes em carga e com isso os cátions e moléculas de água são atraídos, resultando em uma separação das camadas dos minerais. Os autores explicam que a flocculação-aglomeração modifica as estruturas das partículas da argila, que passam de paralelas para aleatórias. As reações pozolânicas são responsáveis pelo aumento da resistência das misturas, pois a cal reage com o ferro, alumina e sílica presentes no solo, formando produtos cimentantes (CAMPELLO *et al.* 2000).

2.2 Tipo de cales e suas propriedades

Guimarães (2001) explica que a cal virgem pode ser obtida com a calcinação de rochas carbonatadas cálcio-magnesianas em temperaturas que variam de 900 a 1200 °C, gerando óxidos de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO). Já a cal hidratada pode ser obtida com a hidratação da cal virgem, formando compostos de hidróxido de cálcio (CaOH₂) e hidróxido de magnésio (MgOH₂) (ABNT NBR 7175:2003). Little (1995) chama a atenção para o termo cal livre ou cal disponível, usado por alguns autores para avaliar a concentração da cal, referindo-se ao óxido de cálcio.

No Brasil, as cales hidratadas são conhecidas comercialmente como CH-I, CH-II e CH-III. Seguindo as recomendações contidas na NBR 7175 (ABNT, 2003), a CH-I apresenta maior pureza, com especificações referentes a propriedade química e física do material mais elevadas, seguida da CH-II e da CH-III que apresentam grau de pureza inferiores.

Devido a maior solubilidade do óxido de cálcio em relação ao óxido de magnésio, a cal calcítica apresenta maior reatividade com o solo do que a cal dolomítica, explica Little (1995). No entanto, o autor destaca que ambas as cales são empregadas com sucesso no processo de estabilização de solos. Assim, a cal dolomítica também apresenta bons resultados, porém a hidratação do MgO acontece de forma mais devagar, o que não influencia na solubilidade do CaOH₂, mas pode influenciar na taxa de reação entre cal e solo.

Segundo Little (1995), o tamanho das partículas é o principal fator para uma eficiente reação entre a cal, a água e o solo. Deste modo, quanto menor a partícula da cal, maior será sua área superficial fazendo com que tenha uma maior taxa de solução na mistura (PRUSINSKI e BHATTACHARJA, 1999). Com base nisso, a NBR 7175 (ABNT, 2003) exige que cales CH-I

tenham no mínimo 90 % de material passante na peneira #200 (0,075 mm); já para as cales CH-II e CH-III, a NBR recomenda que as cales apresentem no mínimo 85% do seu material passante na peneira #200.

2.3 Estabilização Solo-Cal

A utilização de cal no solo pode ter duas finalidades: melhoramento e estabilização. A primeira dá-se com a utilização de teores mais baixos de cal com o objetivo de melhorar propriedades referentes ao comportamento do solo, como a trabalhabilidade e diminuir a sensibilidade da mistura em contato com a água. Já a estabilização está associada a melhora no comportamento da mistura a longo prazo, como aumentando sua resistência e, para isso, é necessário a utilização de teores mais elevados de cal (CRISTELO, 2001).

Clare e Cruchley (1957) *apud*. Núñez (1991) listam quatro efeitos que contribuem para o ganho de resistência das misturas, sendo eles: a) floculação e troca de íons; b) formação de hidróxidos de cálcio; c) formação de carbonato de cálcio; d) formação de silicatos e aluminatos hidratados de cálcio. Também salientam que a floculação e a troca de íons são responsáveis pelos efeitos imediatos sofridos pela mistura com a adição da cal.

Segundo a National Lime Association (2005), a maioria dos solos argilosos reagem quimicamente bem quando estabilizados com cal. No entanto, Davidson e Handy *apud*. Núñez (1991) chamam a atenção para o fato de que reações de carbonatação geram um cimento fraco, podendo inibir as ações pozolânicas reduzindo, assim, os ganhos normais de resistência da mistura.

Remus e Davidson (1961) *apud*. Castelli (2018), verificaram que solos que contêm os argilominerais illita e montmorolonita apresentaram maior afinidade com a cal dolomítica, proporcionando maior resistência ao solo quando misturados. Já os solos que contêm caolinita apresentaram ganhos idênticos, usando a cal dolomítica ou a cal calcítica. Entretanto, os autores constataram que para o solo atingir a máxima resistência é necessário acrescentar uma porcentagem maior de cal dolomítica à mistura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, são apresentadas algumas informações referentes aos materiais utilizados nesta pesquisa, como a classificação dos solos, e a localidade das jazidas, os tipos de cales utilizadas e os ensaios realizados.

3.1 Solos

O primeiro solo apresentado nesta pesquisa foi estudado por Kleinert (2021) e sua coleta foi realizada em uma jazida as margens da BR-376, em Apucarana no Estado do Paraná (PR). Com base no mapa pedológico do Paraná (BHERING, 2007), do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (SANTOS et al., 2018) e nas análises químicas realizadas pela autora, o solo foi classificado como Latossolo Vermelho (LV). O segundo solo está sendo estudado por Diniz (2022, dissertação em andamento) e sua coleta foi realizada em uma jazida às margens da RS-118, em Gravataí, Estado do Rio Grande do Sul (RS). Conforme Diniz (2022, dissertação em andamento) o solo é classificado como sendo um Argissolo Vermelho (PV). As abreviações dos solos estão baseadas no SiBCS. Informações referentes a localização dos solos são apresentadas na Figura 1.

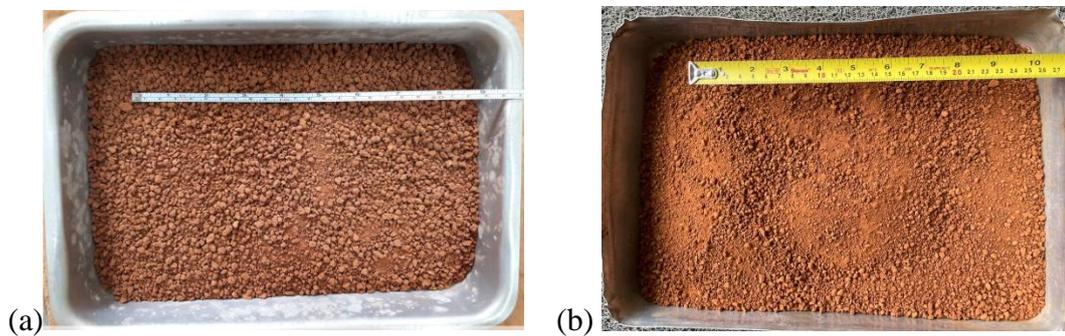
Figura 1 – Localização dos solos estudados



Fonte: autor (2021)

As amostras foram coletadas e depositadas no Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em Porto Alegre – RS. O material foi disposto em bandejas para que fosse seco ao ar e posteriormente, foi destorroado utilizando almofariz com pistilo protegido com capa de borracha para não danificar os grãos do material, conforme indicações da NBR 6457 (ABNT, 2016). Na sequência, foram separadas amostras para a realização dos ensaios. Na Figura 2 são apresentados os solos secos e destorroados estudados neste trabalho.

Figura 2: Solos secos e destorroados: (a) Latossolo Vermelho, (b) Argissolo Vermelho

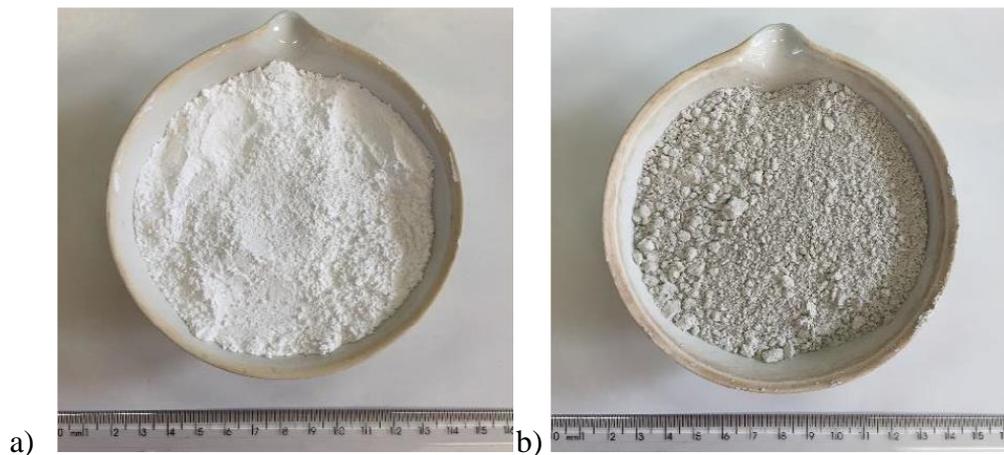


Fonte: a) KLEINERT (2021); b) autor (2021)

3.2 Cales

Para a realização da pesquisa, foram utilizados dois tipos de cales, sendo elas a cal calcítica e a cal dolomítica, conforme indicado na Figura 3. A cal calcítica utilizada neste estudo é proveniente de Minas Gerais (MG) e é considerada uma cal hidratada de alto teor de cálcio pelo fabricante. Já a cal dolomítica utilizada neste é proveniente do Rio Grande do Sul (RS), tratando-se também de uma cal hidratada com alto teor de cálcio e magnésio, conforme especificações do fabricante.

Figura 3: a) Cal calcítica; b) Cal dolomítica



Fonte: Kleinert (2021)

A caracterização das cales foi realizada pela empresa BeloCal – Grupo Lhoist. Na Tabela 1 é possível verificar um teor de óxido de cálcio (CaO) de 73,08% e de 0,55% de óxido de magnésio (MgO) para a cal calcítica. Já para cal dolomítica, os teores de MgO são mais elevados sendo de 31,1%, e os teores de CaO são mais baixos sendo de 45,22%.

Tabela 1 – Teores de CaO e de MgO das cales estudadas

CAL CALCÍTICA		CAL DOLOMÍTICA	
Elementos	Teores (%)	Elementos	Teores (%)
CaO total	73,08	CaO total	45,22
MgO	0,55	MgO	31,1

Fonte: adaptada de KLEINERT (2021)

Em relação às características físicas das cales, a empresa realizou os ensaios com base na NBR 7175 (ABNT, 2003), de forma a verificar e confirmar que as cales apresentam as especificações mínimas exigidas por norma. Kleinert (2021) constatou que as duas cales tiveram menos do que 0,5% do seu material retido na peneira de abertura de 0,600 mm, o que é estabelecido por norma. Em relação à porcentagem de material retido na peneira de abertura de 0,075mm, Kleinert (2021) verificou que a cal calcítica enquadrou-se nas exigências para a CH-I (<10%). Já a cal dolomítica teve um total de 17,19% retido e se enquadrou nas exigências para CH-II (<15%).

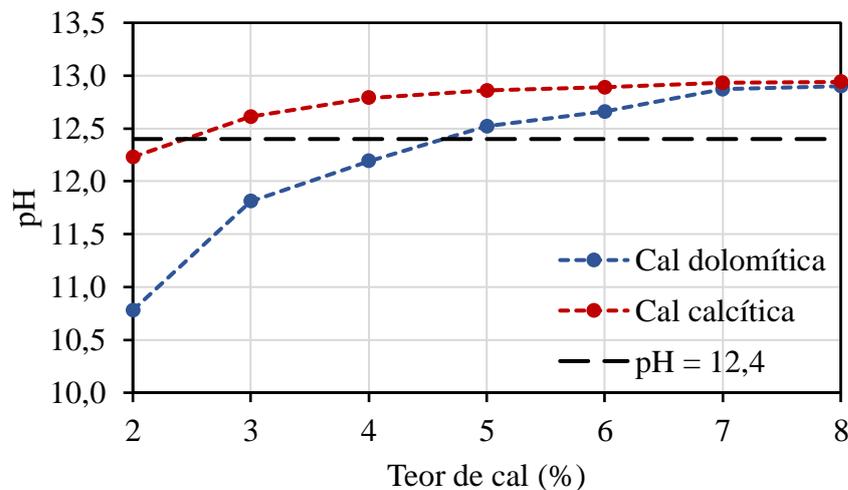
3.3 Dosagem e caracterização das misturas solo-cal

A dosagem é um fator primordial quando se realiza procedimentos de melhoramento ou estabilização de solos. Com ela, é encontrado o teor de cal mínimo necessário para que ocorram, de forma adequada, as reações na mistura solo-cal. Estudos sobre dosagem vêm sendo aprimorados há mais de 60 anos, e neste trabalho será apresentado um deles.

O ensaio do método do pH é normatizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (2019) e consiste na verificação do pH após 1 hora de uma mistura de solo, cal e água, a qual deve alcançar um pH de 12,4. A dosagem consiste, então, no menor valor necessário de cal para atingir esse valor conforme sugerido por Eades & Grim (1966).

Conforme Kleinert (2021), o Latossolo Vermelho atingiu valor de pH superior a 12,4 com adição de 3% de cal calcítica, enquanto com cal dolomítica foi necessário teor de 5% para atingir valor superior a 12,4, como pode ser constatado na Figura 4.

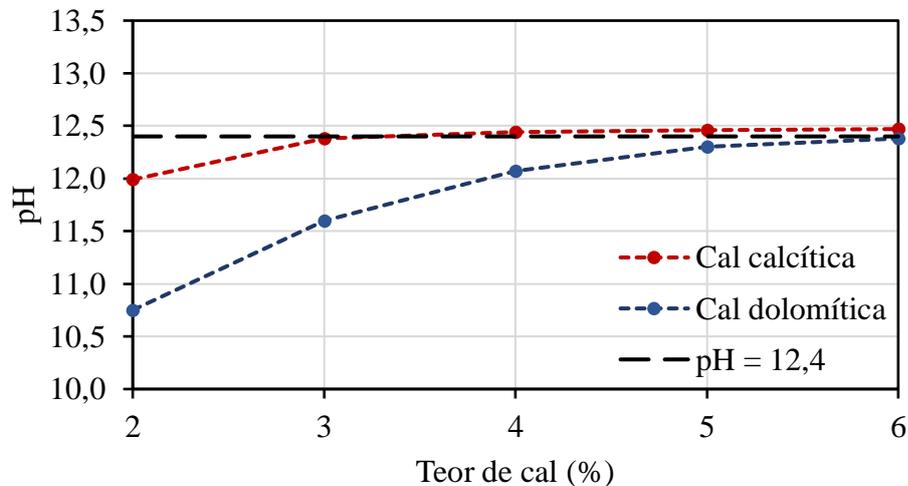
Figura 4 – Resultados do ensaio de pH do Latossolo Vermelho



Fonte: KLEINERT (2021)

Para o Argissolo Vermelho, Diniz (2022, dissertação em andamento) constatou que o teor necessário de cal calcítica para atingir o valor 12,4 de pH na mistura foi de aproximadamente 3%, já para a mistura com adição de cal dolomítica foi necessário teor de 5%, conforme exposto na Figura 5.

Figura 5 – Resultados do ensaio de pH do Argissolo Vermelho.



Fonte: DINIZ (2022, dissertação em andamento)

Devido a cal calcítica atingir valor de 12,4 no pH com 3% e a cal dolomítica atingir o valor de 12,4 com o teor de 5%, optou-se por usar os teores de 3 e 5% para ambas as cales, a fim de avaliar a influência do teor de cal na estabilização da mistura. Com esses valores também foi possível verificar a influência do tempo de cura, comparando os resultados com os valores obtidos por Kleinert (2021) e Diniz (2022, dissertação em andamento) para tempos de cura de 7, 28 e 90 dias, já que as autoras utilizaram também porcentagens de 3% e 5%.

Com os teores de cal definidos em 3 e 5% para ambas as cales, foram feitos pelo menos 5 pontos da curva de compactação para cada mistura, conforme NBR 7182 (ABNT, 2020), empregando a energia modificada. Desta forma, foi possível definir o teor de umidade ótima ($\omega_{ót}$) e a massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{dmáx}$) das misturas. Verificou-se que a adição das cales no Latossolo Vermelho diminuiu os valores de umidade ótima e aumentaram os valores da massa específica aparente seca das misturas em comparação com o solo natural. Já para o Argissolo Vermelho, verificou-se efeito oposto, a adição da cal aumentou o teor de umidade ótima e diminuiu os valores da massa específica aparente seca das misturas. Os valores obtidos podem ser encontrados na Tabela 2 para o Latossolo Vermelho e na Tabela 3 para o Argissolo Vermelho. A primeira parte da identificação refere-se ao tipo do solo, o número ao teor de cal e a última parte ao tipo de cal, por exemplo LV-3CC significa Latossolo Vermelho com adição de 3% de cal calcítica, enquanto que PV-5CD significa Argissolo Vermelho com adição de 5% de cal dolomítica.

Tabela 2 – Parâmetros de compactação do Latossolo Vermelho

IDENTIFICAÇÃO	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g/cm³)	ω_{6t} (%)
Solo natural	1,546	29,70
LV-3CC	1,555	28,40
LV-3CD	1,586	27,40
LV-5CC	1,529	29,80
LV-5CD	1,580	27,00

Fonte: adaptada de KLEINERT (2021)

Tabela 3 – Parâmetros de compactação do Argissolo Vermelho

IDENTIFICAÇÃO	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g/cm³)	ω_{6t} (%)
Solo natural	1,875	17,90
PV-3CC	1,838	18,95
PV-3CD	1,856	18,10
PV-5CC	1,822	18,90
PV-5CD	1,844	19,60

Fonte: adaptada de DINIZ (2022, dissertação em andamento)

Na Tabela 4 são apresentadas as misturas que foram estudadas neste trabalho, sendo elas as combinações do Latossolo Vermelho e do Argissolo Vermelho com as cales calcítica e dolomítica. Para cada mistura, foram moldados 6 corpos de prova (CPs); destes, 3 são para os ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e 3 para os ensaios de durabilidade, resultando em um total de 48 CPs.

Tabela 4 – Misturas solo-cal

MISTURA SOLO-CAL	TEOR DE CAL	LV N° DE CPs	PV N° DE CPs
Cal calcítica	3%	6	6
	5%	6	6
Cal dolomítica	3%	6	6
	5%	6	6

Fonte: autor (2021)

3.4 Ensaio de resistência à compressão simples

O ensaio foi realizado conforme a norma americana D5102 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009). Os dois solos foram secos ao ar e posteriormente destorroados em um almofariz e peneirados na peneira n°4 (4,76 mm). Após esse processo, realizou-se o quarteamento do material e armazenamento das porções relativas a cada CP em sacos plásticos. Para a realização do ensaio, acrescentou-se, com 24 horas de antecedência, 10% da quantidade de água necessária para atingir a umidade ótima para o Latossolo Vermelho e 15% para o Argissolo Vermelho. Uma hora antes da moldagem adicionou-se o restante da água e a cal. A moldagem foi realizada em 3 camadas de mesma espessura, escarificando a superfície de cada camada para aumentar a aderência entre elas, como pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Escarificação da superfície do material



Fonte: autor (2021)

Tanto para o ensaio de resistência à compressão simples como para o ensaio de durabilidade, foram moldadas triplicatas de corpos de prova para cada mistura. Calculou-se, então, a média desses 3 CPs, e caso o valor dos CPs ficasse fora da média, era descartado o valor e refeito a média. Moldou-se um total de 48 CPs, sendo 24 para resistência à compressão simples e 24 para ciclos de molhagem e secagem.

Cada CP foi então colocado dentro de um saco plástico, identificado e deixado em câmara úmida para a realização da cura, conforme Figura 7. Metade dos corpos de prova que passaram por ciclos de molhagem e secagem curaram por 14 dias, enquanto aqueles que foram submetidos ao ensaio de RCS curaram por 38 dias.

Figura 7 –Identificação e proteção do CP



Fonte: autor (2021)

Após cura de 38 dias, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples do material. Para isso, utilizou-se uma prensa da marca Wykeham Farrance com capacidade de 50 kN e velocidade de deformação de 1,14 mm/min. Na Tabela 5 são apresentados valores de RCS dos solos naturais encontrados por Kleinert (2021) e Diniz (2022, dissertação em andamento).

Tabela 5 – Resultados de RCS do solo natural

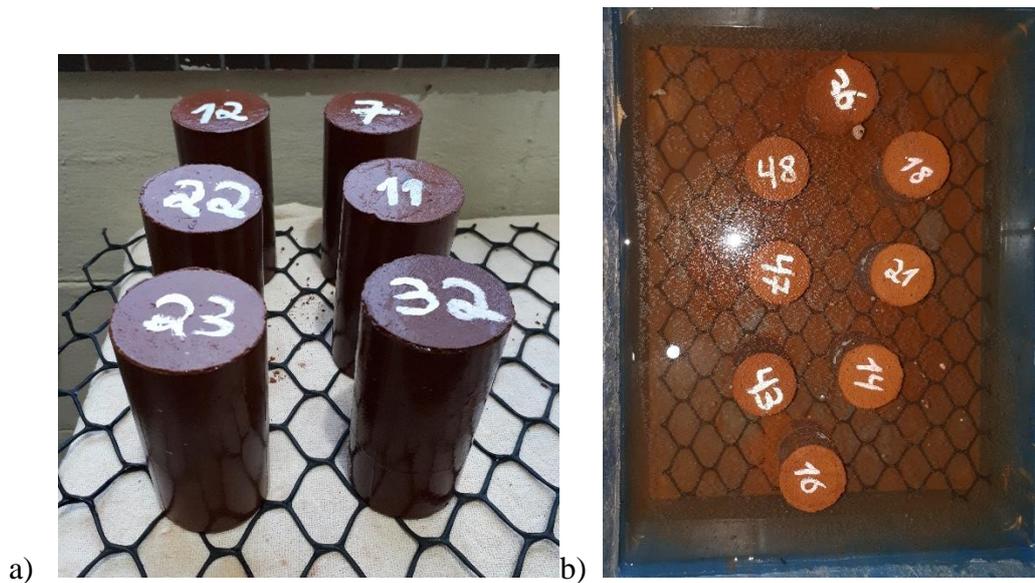
Identificação	RCS (MPa)
(a) Latossolo Vermelho	0,95
(b) Argissolo Vermelho	2,33

Fonte: (a) KLEINERT (2021); (b) DINIZ (2022, dissertação em andamento)

3.5 Ensaio de Durabilidade

Com o intuito de analisar os efeitos da exposição das misturas solo-cal à água, seguiu-se as recomendações do método *Iowa*, proposto por Hoover, Handy e Davidson (1958). Seguindo os mesmos padrões de moldagem que foram utilizados para a moldagem dos corpos de prova para RCS, foram moldados corpos de prova com 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, os quais ficaram curando em câmara úmida por 14 dias. Após o período de cura, foram realizados ciclos de secagem e molhagem que consistiam em manter o CP durante 24 horas secando ao ar e 24 horas submersos em água, este processo pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – a) CPs secando ao ar; b) CPs submersos em água



Fonte: autor (2021)

Por fim, avaliou-se a relação entre a resistência das misturas solo-cal submetidas aos ciclos e a resistência das misturas que ficaram apenas em cura úmida. São consideradas aptas quanto a durabilidade, as misturas que apresentarem uma relação de no mínimo 80%.

4 RESULTADOS

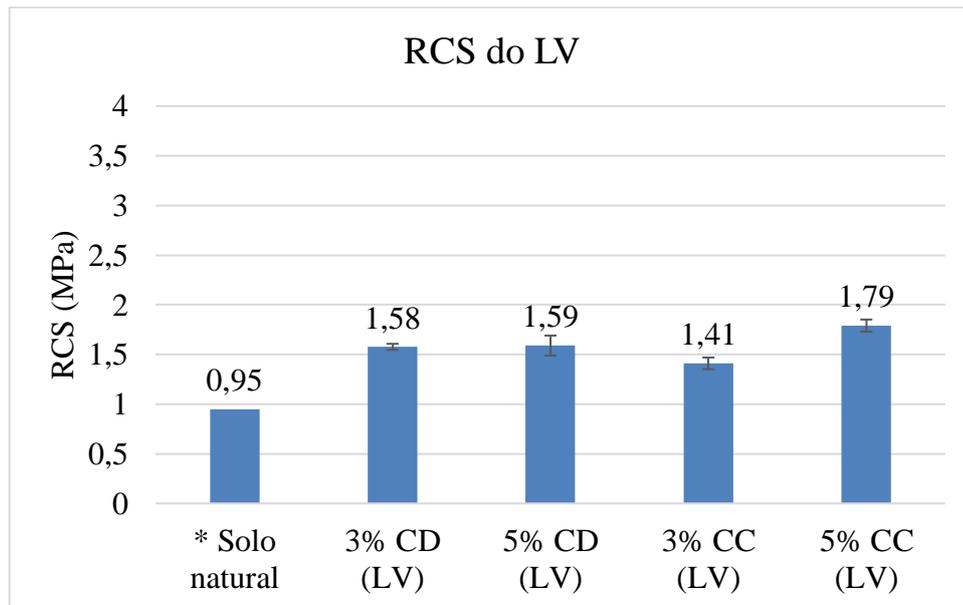
4.1 Latossolo Vermelho

As misturas de solo-cal foram cuidadosamente preparadas e homogeneizadas, de forma a tentar chegar o mais próximo do teor de umidade ótima e atingir um grau de compactação de 100%. Todas as misturas ficaram próximas da umidade ótima, apresentando uma variação de 0,29% e ficando localizadas no ramo seco da curva de compactação. Em relação ao grau de compactação, apenas a mistura com 5% cal dolomítica ficou com 98%, enquanto que as demais apresentaram valor de 99%. As dimensões de altura e diâmetro foram verificadas, e todas apresentaram variação abaixo de 1mm, tanto para altura como para o diâmetro.

A Figura 9 mostra os resultados referentes aos ensaios de resistência à compressão simples das misturas com seus respectivos teores e cales utilizados. Observando os resultados, é possível notar um aumento na resistência do material com o aumento do teor de cal calcítica incorporado, já para a cal dolomítica não houve aumento de sua resistência, ficando os valores praticamente

iguais. Com teor de 3%, a cal dolomítica apresentou melhor resultado em comparação com a cal calcítica, no entanto quando foi utilizado 5% de cal, a cal calcítica apresentou maior resistência do que a cal dolomítica. Em comparação com o solo natural, as duas cales influenciaram positivamente para o aumento da resistência da mistura.

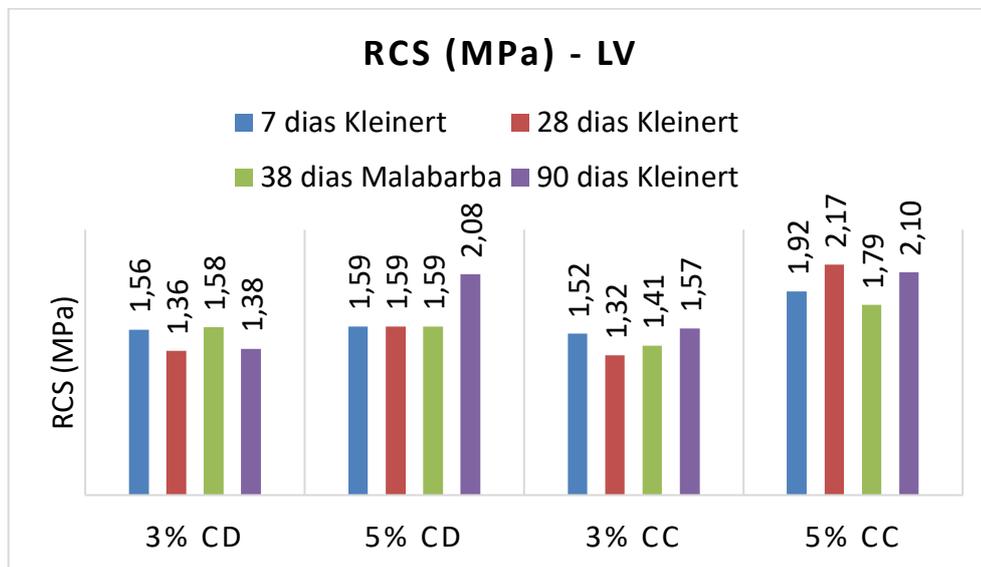
Figura 8 – Resistência à compressão simples com 38 dias de cura



Fonte: autor (2021); *KLEINERT (2021)

Comparando-se os valores de resistência aos 38 dias expostos neste trabalho com os valores obtidos por Kleinert (2021) para 7, 28, 90 dias, foi possível avaliar a influência do tempo nos resultados. Na Figura 10 pode-se verificar que praticamente todas as misturas apresentaram oscilações nos valores de resistência com o aumento do tempo de cura, o que leva a crer que após os 7 dias de cura, o tempo não teve influência significativa nos valores de resistência.

Figura 10 – Influência do tempo de cura na resistência à compressão simples das misturas de Latossolo Vermelho e cal



Fonte: autor (2021); Kleinert (2021)

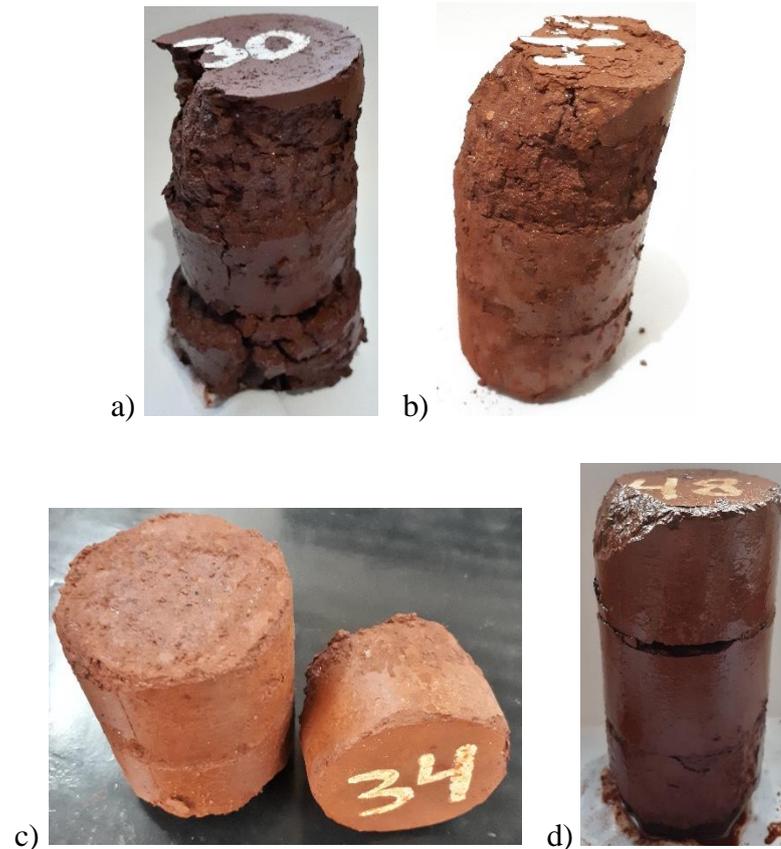
Com o intuito de analisar os efeitos da exposição das misturas solo-cal à água, seguiu-se as recomendações do método *Iowa*, proposto por Hoover, Handy e Davidson (1958). Os corpos de prova, após ficarem 14 dias curando em câmara úmida, sofreram ciclos de molhagem e secagem, iniciando com 24 horas secando ao ar e 24 horas submersos em água. Na Tabela 6, tem-se o número médio de ciclos que cada mistura resistiu, sendo que as misturas com cal dolomítica, tanto para 3% quanto para 5%, não suportaram mais do que um ciclo de molhagem e secagem, ficando severamente degradadas (Figura 11). As misturas com 3% e 5% cal calcítica suportaram a quase totalidade dos ciclos, no entanto apresentaram problemas na superfície de ligação entre as camadas, mesmo escarificando bem a superfície antes de receber a próxima camada durante a moldagem, como pode ser visto na Figura 10.

Tabela 6 – Ciclos de molhagem e secagem médios - LV

Identificação	Média dos ciclos resistidos
3% CD	1
5% CD	1
3% CC	10
5% CC	12

Fonte: autor (2021)

Figura 11 – a) 3% CD; b) 5% CD; c) 3% CC; e) 5% CC



Fonte: autor (2021)

Por fim, tanto as misturas com cal calcítica como com cal dolomítica não puderam ser ensaiados em relação a resistência à compressão simples devido ao alto grau de degradação sofrida durante os ciclos. Lovato (2004) também constatou uma degradação severa em suas amostras de Latossolo Vermelho com adição de 4% e 5% de cal calcítica, realizando os ensaios de resistência à compressão simples com apenas 6 ciclos concluídos. Mesmo tendo bons resultados de resistência à compressão simples, a mistura não suportou os 12 ciclos proposto pelo método, de modo que para aumentar sua durabilidade, talvez seja necessário aumentar a porcentagem de cal na mistura.

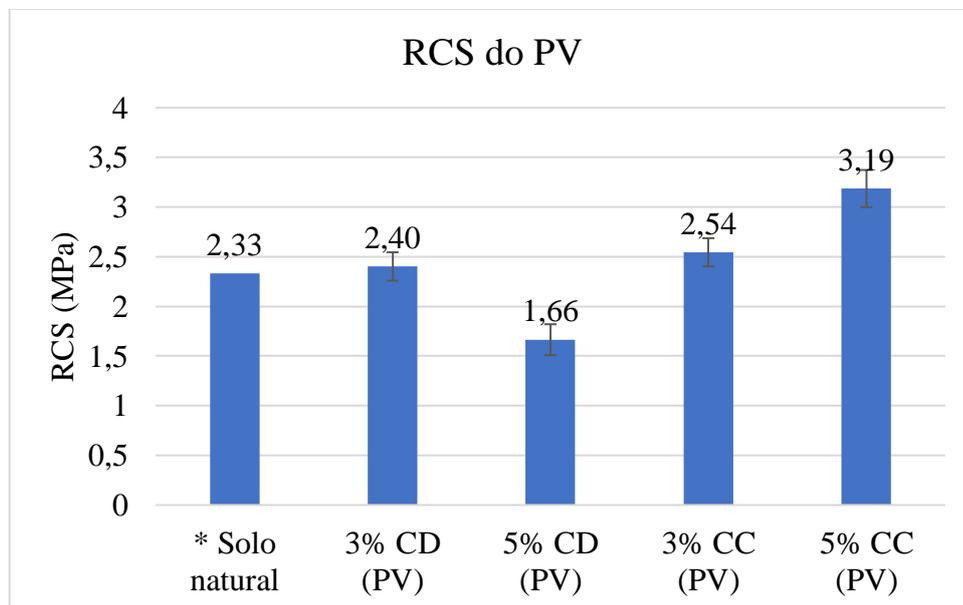
4.2 Argissolo Vermelho

Novamente, as misturas foram cuidadosamente preparadas e homogeneizadas, de forma a tentar chegar o mais próximo do teor de umidade ótimo e atingir um grau de compactação de 100%. Todas as misturas ficaram próximas da umidade ótima (diferença de no máximo 0,26% abaixo da umidade ótima), localizadas no ramo seco da curva de compactação. Em relação ao grau de compactação, as misturas com 5% cal dolomítica apresentaram valores entre 96% e 97%, já as

misturas com cal calcítica apresentaram valores acima de 98%. As dimensões de altura e diâmetro foram verificadas e apresentaram pequenas variações entre elas.

A Figura 12 mostra valores referentes aos ensaios de resistência à compressão simples das misturas com seus respectivos teores e cales utilizados. Os resultados mostraram aumento da resistência com o aumento do teor de cal para as misturas com cal calcítica, tendo um aumento de aproximadamente 25% na resistência, chegando a um valor de 3,19 MPa com 5%. Já as misturas com cal dolomítica tiveram comportamento inverso: o aumento do teor de cal diminuiu a resistência das amostras. Um comportamento que não era esperado.

Figura 12 – Resistência à compressão simples com 38 dias de cura.



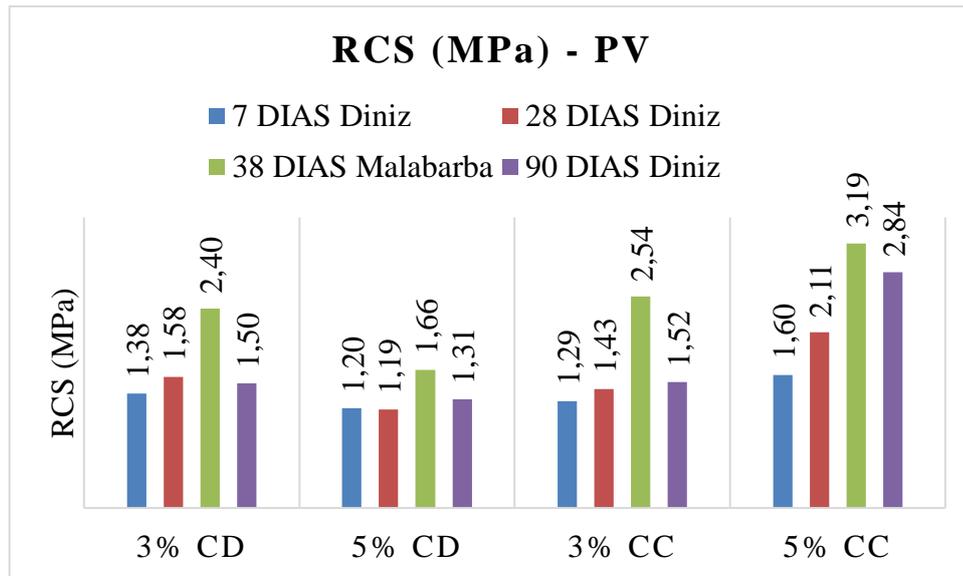
Fonte: autor (2021); * DINIZ (2022, dissertação em andamento)

Conforme observado na Figura 12, pode-se verificar que a cal calcítica teve um melhor comportamento, proporcionando uma resistência de 2,54 MPa com a adição de 3% de cal, valor mais elevado do que qualquer um dos resultados apresentado pelas misturas com adição de cal dolomítica. Em comparação com o solo natural, a adição de cal calcítica resultou em ganho de resistência; já a mistura com cal dolomítica não apresentou resultados muito expressivos, tendo até redução de sua resistência com o teor de 5%.

Quando avaliada a influência do tempo de cura, comparando-se os valores com os resultados obtidos por Diniz (2022, dissertação em andamento), pode-se verificar, na Figura 13, um aumento da resistência até os 38 dias de cura e, posteriormente, uma redução da resistência com 90 dias de cura. Na literatura, pode-se encontrar comportamento parecido, Lovato (2004)

analisou a influência do tempo de cura em um solo laterítico e constatou que a mistura com cal calcítica teve ganhos de resistência até os 56 dias e redução de sua resistência após isso. O autor indica, como uma possível hipótese, o tempo entre moldagem dos corpos de prova, que pode ter levado à carbonatação da cal armazenada nesse período. Para um melhor entendimento do comportamento das misturas, seriam necessários ensaios adicionais.

Figura 13 - Influência do tempo de cura na resistência das misturas



Fonte: autor (2021); Diniz (2022, dissertação em andamento)

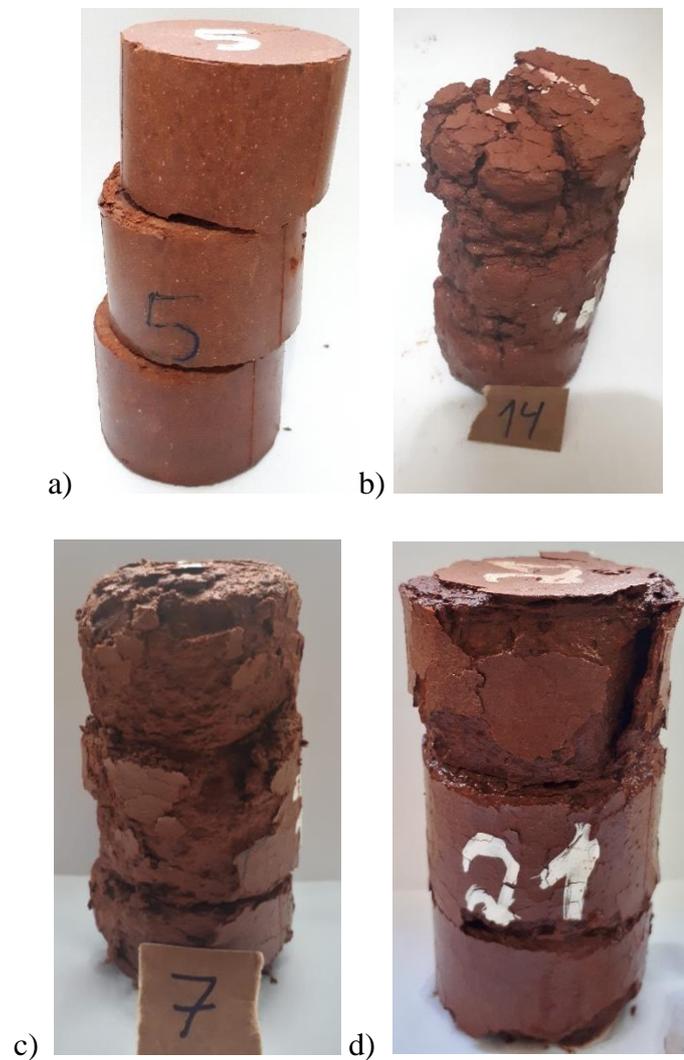
O Argissolo Vermelho também foi submetido a ciclos de molhagem e secagem seguindo as recomendações do método do *Iowa*. Na Tabela 7 são apresentados os números médios de ciclos resistidos por cada mistura de solo-cal. A mistura com 3% cal dolomítica não resistiu à mais do que um ciclo devido à separação total da camada, no entanto não apresentava degradação de sua estrutura. Por outro lado, os CPs que tiveram adição de 3% de cal calcítica e 5% de cal dolomítica resistiram a 12 e 9 ciclos, respectivamente, porém apresentaram uma degradação severa de suas estruturas o que impossibilitou a continuação do ensaio. As misturas com 5% cal calcítica pareciam estruturalmente mais conservadas, no entanto apresentaram problemas na superfície de ligação entre as camadas, de modo que as 3 camadas se separaram totalmente, impossibilitando a realização do ensaio de resistência à compressão simples. As imagens dos corpos de prova podem ser vistas na Figura 14.

Tabela 7 – Ciclos de molhagem e secagem médios - PV

Identificação	Média dos ciclos resistidos
3% CD	1
5% CD	9
3% CC	12
5% CC	11

Fonte: autor (2021)

Figura 14 – a) 3% CD; b) 5% CD; c) 3% CC; d) 5% CC



Fonte: autor (2021)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Latossolo Vermelho, tanto a cal calcítica como a cal dolomítica aumentaram as resistências das misturas quando comparadas com o solo natural. Já no Argissolo Vermelho, a cal calcítica teve resultado positivo aumentando a resistência das misturas em ambos os teores; no entanto, a cal dolomítica apenas o teor de 5% apresentou resultado positivo. O aumento dos teores de cal calcítica nas misturas aumentaram as resistências de ambos os solos. Já o aumento do teor da cal dolomítica não apresentou ganhos expressivos no Latossolo Vermelho e; para o Argissolo Vermelho, o aumento resultou em uma queda da resistência da mistura.

Comparando os valores de resistência do Latossolo Vermelho a 38 dias de cura com os valores a 7, 28 e 90 dias de cura de Kleinert (2021), verificou-se que o tempo de cura não influenciou para o aumento da resistência. Já comprando os valores com Diniz (2022, dissertação em andamento), as misturas do Argissolo Vermelho tiveram ganho de resistência até 38 dias e diminuiram sua resistência com 90 dias: o que pode ter ocorrido devida a carbonatação da cal devido a diferença de tempo entre a moldagem dos corpos de prova.

Os ciclos de molhagem e secagem mostraram-se bastante prejudiciais às misturas de ambos os solos, sendo que nenhuma delas suportou todos os 12 ciclos recomendados pelo método de *Iowa*. O aumento do teor da cal calcítica aumentou a resistência aos ciclos do Latossolo Vermelho, já o aumento do teor de cal dolomítica não aumentou o número de ciclos resistidos pelas misturas. Em relação ao Argissolo Vermelho, o aumento do teor de cal dolomítica apresentou bons resultados, aumentando o número de ciclos resistidos pela mistura. Ambos os solos apresentaram problemas nas camadas de ligação, principalmente nas misturas que apresentaram menor degradação de suas estruturas, sendo necessário uma investigação mais detalhada da causa.

A cal calcítica, no entanto, apresentou melhores resultados nos ensaios de durabilidade, sendo que para ambos os solos, a adição da cal elevou o número de ciclos de molhagem e secagem resistidos pelas misturas.

Por fim, recomenda-se a utilização de 5% de cal calcítica para o Latossolo Vermelho pois teve um elevado ganho de resistência em comparação com o solo natural chegando a 3,19MPa e uma melhora na durabilidade em comparação com a cal dolomítica. Já para o Argissolo Vermelho, recomenda-se a utilização de 5% de cal calcítica a qual regou elevado ganho na

resistência da mistura chegando a 3,19 MPa e também melhorou a durabilidade do solo em comparação com a cal dolomítica.

6 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D5102: **Standard Test Methods for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime**. Washington D. C.: 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175: Cal Hidratada para Argamassas – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo - ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2020.

BHERING, S. B. **Mapa de Solos do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro: Embrapa solos, 2007.

CASTELLI, I. G **Estudo da durabilidade de misturas solo-cal**. 2018. Trabalho de diplomação (Engenharia Civil), Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. p. 78.

CASTRO, F. J. C. de O. **Contribuição ao conhecimento e à determinação da reatividade de solos sesquioxídicos utilizando o hidróxido de cálcio: aplicação ao processo de geopolimerização (estabilização)**. Tese (Doutorado em Ciências), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE. Rio de Janeiro, 344 p., 1995.

CRISTELO, Nuno Miguel Cordeiro. **ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS RESIDUAIS GRANÍTICOS ATRAVÉS DA ADIÇÃO DE CAL**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Estruturas, geotecnia e fundações, Universidade do Minho.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 414: Pavimentação – Solo-Cimento - Dosagem físico-química de solo-cimento – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2019.

DINIZ, B. C. **Estabilização físico-químico de um argissolo para emprego na pavimentação.** Dissertação em andamento com previsão de defesa para 2020. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. A Quick Test to Determine Lime Requirements For Lime Stabilization. **Highway Research Record**, v. 139, p. 61–72, 1966.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal - Impurezas originadas da matéria-prima.** São Paulo: Associação Brasileira dos Produtores de Cal, 2001.

HOOVER, J. M; HANDY, R. L. & DAVIDSON, D. T. **Durability of Soil-Lime-Fly Ash Mixtures Compacted above Standard Proctor Density.** Highway Research Board Bulletin, Washington, D. C. 193: 1-11, 1958.

KLEINERT, T. R. **Estabilização de solos tropicais com cal e impactos no dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos.** 2021. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. p.284

LITTLE, Dallas N. **Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime.** McGregor: Lime Association of Texas, 1995.

LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

NATIONAL LIME ASSOCIATION. **Lime treated soils save time & money.** 2005.

NOGAMI, J. S.;VILLIBOR, D. F. **Os Solos Tropicais Lateríticos e Saprolíticos e a Pavimentação.** In: 18ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 1993, Porto Alegre. Anais...p. 463-484.

NOGAMI, J. S.;VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos.** São Paulo: Villibor, 1995

NÚNEZ, Washington Peres. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito botucatu, visando seu emprego na pavimentação.** 1991. Dissertação (Mestrado em

Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARJA, S. **Effectiveness of Portland cement and lime stabilizing clay soils**. Transportation Research Record, n. 1652, p. 215–227, 1999. doi: <https://doi.org/10.3141/1652-28>

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa, 2018.