

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção e Infraestrutura

**ESTABILIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE UM ARGISSOLO
PARA EMPREGO EM PAVIMENTAÇÃO**

Bruna Calabria Diniz

Porto Alegre
2022

BRUNA CALABRIA DINIZ

**ESTABILIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE UM ARGISSOLO
VERMELHO PARA EMPREGO NA PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil – Construção e Infraestrutura da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestra em Engenharia

Porto Alegre
2022

BRUNA CALABRIA DINIZ

**ESTABILIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE UM ARGISSOLO
VERMELHO PARA EMPREGO NA PAVIMENTAÇÃO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de mestra em engenharia e foi aprovada pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 31 de março de 2022.

Prof. Dr. Washington Peres Núñez
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Prof. Dr. William Fedrigo (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Coorientador

Prof.^a. Angela de Moura F Danilevicz
Coordenadora do PPGCI (UFRGS)

BANCA EXAMINADORA

Prof. Leonardo Behak (Universidad de la República, Uruguay)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Glicério Trichês (UFSC/UNESC)
Dr. pelo ITA/CTA

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

DINIZ, B. C. Estabilização Físico-Química de um Argissolo Vermelho para Emprego na Pavimentação. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

A pesquisa relatada nesse trabalho buscou avaliar a possibilidade do emprego de misturas de solo e cal em pavimentos. Estudou-se um solo classificado como sendo Argissolo Vermelho, visando sua estabilização com dois tipos de cales (calcítica e dolomítica). Avaliou-se o comportamento mecânico das misturas, considerando o efeito de diferentes tempos de cura, teores e tipos de cal, além de analisar a evolução das reações entre solo e cal por meio de ensaios microestruturais e mineralógicos. Foram selecionados dois teores de cal (3% e 5%) para verificação de parâmetros mecânicos das misturas (resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral). Posteriormente, usou-se o teor de 5% para análise da evolução das reações cimentantes e do desempenho mecânico por meio de ensaios de resistência à tração na flexão visando o emprego dos resultados destes em análises mecanísticas. As misturas com cal calcítica, apresentaram resultados de resistência mecânica superiores às misturas com cal dolomítica. O solo mostrou-se reativo à cal calcítica, tendo sua resistência aumentada ao longo do tempo de cura. Nas análises relacionadas à microestrutura textural, observou-se o fechamento das matrizes ao longo do tempo de cura por meio de análises MEV. Todavia, observou-se que as misturas com cal dolomítica apresentaram-se mais porosas, com aspecto de folhas sobrepostas com um pó disperso sobre a matriz, atrelado às impurezas da cal. Quanto às análises mineralógicas, na mistura com cal calcítica, observou-se o consumo quase total da cal até 180 dias, bem como progressivo consumo dos argilominerais caulinita, muscovita, além do quartzo. Enquanto que na mistura com cal dolomítica houve o surgimento de picos de calcita, além de baixíssimo consumo dos picos dos argilominerais. Análises mecanísticas indicaram que a adoção de sub-base de camada granular trabalhando em conjunto com a camada de solo-cal melhora o comportamento do pavimento. Tais análises mostraram ainda que os pavimentos nos quais se aplicou misturas com cal calcítica apresentaram vidas de serviço ligeiramente superiores àquelas obtidas para pavimentos com cal dolomítica. No geral, a pesquisa demonstrou que seria possível utilizar camadas de solo-cal em pavimentos, sendo as misturas com cal calcítica mais recomendadas.

Palavras-chave: estabilização de solos, solo-cal, cal calcítica, cal dolomítica.

ABSTRACT

DINIZ, B. C. Physical-Chemical Stabilization of a Red Argisol for Use in Pavements. 2022. Dissertation (Master Degree in Civil Engineering) – Civil Engineering Post-Graduation Program, Federal University of Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre.

The research reported in this dissertation aimed at evaluating the suitability of mixtures of tropical soil and lime in pavements. Therefore, a soil classified as Red Argisol was studied, aiming at its stabilization with two types of limes (calcitic and dolomitic). This research evaluated the effects of different curing times and lime types and contents on the mechanical behavior of the mixtures. It also evaluated the evolution of the reactions between soil and lime using microstructural and mineralogical tests. Two lime contents (3% and 5%) were selected to evaluate the mechanical parameters of the mixtures (unconfined compressive strength and indirect tensile strength). Subsequently, a lime content of 5% was used to analyze the evolution of the cementing reactions and the mechanical performance using flexural tests, and the results were used in mechanistic analyses. The mixtures with calcitic lime presented a superior mechanical behavior compared to the mixtures with dolomitic lime. The soil proved to be reactive to calcitic lime, showing a strength increase over time. Regarding the textural microstructure, Scanning Electron Microscopy analysis showed that the matrices became denser with time. However, it was observed that the mixtures with dolomitic lime were more porous, with an appearance of overlapping sheets with a dispersed powder over the matrix, which is possibly linked to lime impurities. Considering the mineralogical analyses, in the mixture with calcitic lime, almost total consumption of lime was observed up to 180 days. Quartz and a progressive consumption of kaolinite and muscovite clay minerals were also observed. For the mixture with dolomitic lime, it was observed the presence of calcite peaks. In addition, low consumption of clay mineral peaks was also observed. Mechanistic analyzes indicated that the adoption of a granular layer sub-base working together with the soil-lime layer improves the behavior of the pavement. Such analyzes also showed that the pavements in which limestone mixtures were applied presented service lives slightly higher than those obtained for pavements with dolomitic lime. Overall, the research showed that it would be possible to use soil-lime layers in pavements, with limestone mixtures being the most recommended.

Keywords: soil stabilization, soil-lime, calcitic-lime, dolomitic-lime.

Dedico esse trabalho aos meus pais,
minha amada avó Aldair (*in memoriam*) e
a minha tia e segunda mãe, Circe.

AGRADECIMENTOS

É inevitável iniciar meus agradecimentos sem citar as grandes mulheres que tanto contribuíram em minha formação pessoal e acadêmica. Por isso, agradeço primeiramente a minha mãe, Edilce, meu maior exemplo de força, dedicação, independência e teimosia. Aquela que sempre me incentivou a estudar e nunca cobrou que o fizesse. Ela sempre soube que aprenderia pelo exemplo.

A minha tia, dinda e segunda mãe, Circe, por desempenhar tão bem o papel de amiga, escutando minhas dores e oferecendo o ombro sempre que precisei. À grande mulher que aprendo ainda, todos os dias, sobre sororidade e independência.

A minha vó, Aldair (*in memoriam*), pelo melhor colo e abraços do mundo, por se fazer presente nos meus sonhos e no meu coração por todo o sempre. Contigo aprendi que não devo permanecer em lugares que não me caibam. Àquela mulher que sempre será meu maior exemplo de amor e empatia.

Agradeço à professora Dra. Angela Masuero pelas palavras amigas no momento de maior fragilidade durante todo o mestrado. Eu nunca vou ter palavras para expressar o quanto teu gesto foi importante para mim. Em uma área predominantemente masculina, encontrar mulheres, docentes, afáveis e dispostas a ajudar os alunos com tanto comprometimento, é louvável. Obrigada, principalmente, por mostrar-se tão admirável a ponto de fazer com que mais discentes espelhem-se em ti.

As outras professoras com as quais tive o privilégio de ter aulas/contato: Dra. Denise Dal Molin, Dra. Ana Passuello, Dra. Carla Ten Caten e PhD. Ângela Graeff.

As minhas amigas e colegas Dra. Thaís Kleinert e Eng.^a Larissa Guerra por todo auxílio durante a pesquisa. Sem vocês duas, com certeza, o caminho teria sido muito mais penoso. Obrigada por me compreenderem, opinarem e puxarem minha orelha quando necessário. Vocês trouxeram pitadas de calma e docilidade para essa etapa da minha vida.

As minhas amigas/colegas da pós-graduação por compartilharem suas respectivas jornadas, angústias e conquistas. Ma. Anna Zappe, Ma. Camila Kern, Ma. Helena Quadros, Ma. Helena Strieder, Ma. Mariana Stein e Eng.^a Carine Molz, lembrarei de cada uma de vocês com muito amor. Agradeço da mesma forma às amigas/colegas do LAPAV, Dra. Gracieli Colpo, Ma.

Bethania Machado, Téc.^a Livia Andrade, Ma. Luiza Godoi, Ma. Natália Mensch, Juliana Farina, Daniele Roehrs e Elisabete Fonseca. Obrigada por compartilharem comigo seus dias, com certeza sem a presença de vocês eles teriam sido menos divertidos!

As minhas amigas da vida, obrigada por todo o suporte emocional desde o início dessa jornada. Tem um pouquinho de cada uma de vocês em cada página dessas. Obrigada por mostrarem-se disponíveis a me ouvir, entender e mostrar alternativas para todos os problemas que encontrei. Muito obrigada Flávia Zeni, Maíza da Rosa, Mariele Barcelos, Patrícia Goulart, Rosiele Fleck, Tamires Vercelino, Luciana Cardoso, Muriel Prestes e Cláudia Gonçalves.

Ao meu pai, Alcidino, que nunca entendeu o significado do mestrado para mim, entretanto, sempre me apoiou. O amor é sobre isso. Ao grande homem que sempre teve o sonho de ter um curso superior, mas quando jovem não teve condições financeiras para isso. Hoje conquistei isso e mais, graças a ele também.

Ao Dr. William Fedrigo, meu coorientador, pela disponibilidade e cordialidade. Dificilmente encontraria um coorientador tão disposto a auxiliar, preocupado e minucioso. Te admiro como pesquisador e ser humano, aprendi e aprendo a cada conversa contigo! Obrigada por topar esse desafio.

Ao professor Dr. Washington Núñez pelas horas de convívio quando cheguei à Porto Alegre. Nem em meus melhores sonhos imaginei ser tão bem recebida. Obrigada pelo conhecimento compartilhado e horas dedicadas a mim.

Ao professor PhD. Lélío Brito, pois se não fosse todo o teu suporte laboratorial minha pesquisa e de tantos outros pesquisadores não seria possível. Sempre sonhei estar em um grande laboratório e com certeza, graças ao teu trabalho diário junto ao LAPAV, isso foi viável. Obrigada por acreditar em mim, convidando-me a participar de outros projetos ao longo do mestrado. Me sentir útil para uma entidade e pessoas é primordial para mim.

Ao professor Dr. Jorge Ceratti que sempre se mostrou muito cordial e disposto a auxiliar. Talvez as pessoas não tenham dimensão de nossa admiração por elas, e para aquela graduanda de Engenharia Civil que lia teu nome nos livros, ter contato com o senhor é um grande privilégio!

Aos meus ex-colegas da graduação, Me. Claudio Queiroz e Me. Giovanni Batista, por todo auxílio durante minha pesquisa, pelas aulas online e intermináveis horas de conversa. Obrigada de coração por todo o apoio emocional e intelectual! Sem a ajuda de vocês nada disso seria possível.

Aos demais colegas e amigos da pós-graduação e laboratório: graduandos em Engenharia Civil: Lucas Malabarba e Vitor Martello, Eng. Henrique Grimm, Me. Celso Romeiro, Téc. Matheus Rodrigues, Eng. Daniel Fernandes, Eng. Fabrício Trescastro, Me. Gabriel Schreinert, Eng. Matheus Mendonça, Me. Lucas Heller, Eng. Diones Barboza e Me. Matheus Matuella.

A tantas outras pessoas que tive contato durante esse período, colegas, amigos e professores, obrigada por cada troca, por cada aprendizado, pela paciência e também pelos momentos difíceis (que assim como na graduação, não foram poucos). A pós-graduação também é uma porta para o amadurecimento do pesquisador e ser humano, você escolhe o que agrega, conhecimento ou mais do que isso. No final de tudo, finalizo-a com mais anseio para poder transformar o que puder.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI) por todo apoio e trabalho prestado, e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) por manter-se lutando com a mesma excelência de sempre, mesmo em tempos tão obscuros para a educação e ciência no Brasil.

“As mulheres que me antecederam
por sangue,
linhagem
linguagem
me ensinaram o saber-fazer
das coisas.
me mostraram,
silenciosamente em seus andares,
o que contém na fibra dos dias.
bordaram o indizível.
me atravessaram com suas crias-ações.
das mulheres que me envolvem
e encantam
só posso dizer:
a coragem me margeia
tempo e vida.”

Bárbara Pereira Mançanares

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	23
1.2	OBJETIVO PRINCIPAL.....	23
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
1.4	LIMITAÇÕES	24
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	HISTÓRICO DA UTILIZAÇÃO DA CAL NO MUNDO	26
2.2	A UTILIZAÇÃO DA CAL NO BRASIL.....	28
2.3	CLASSIFICAÇÃO PEDOLÓGICA.....	31
2.4	ARGISSOLOS	32
2.5	REAÇÕES SOLO-CAL	34
2.5.1	Trocas catiônicas	35
2.5.2	Floculação e aglomeração	37
2.5.3	Carbonatação.....	37
2.5.4	Reações Pozolânicas	40
2.6	MÉTODOS DE DOSAGEM	42
2.6.1	Método Lime Fixation Point.....	42
2.6.2	Método do pH	42
2.6.3	Método de Thompson.....	43

2.6.4	Método das Pastilhas – Metodologia MCT	43
2.7	FATORES QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO DAS MISTURAS SOLO-CAL	44
2.7.1	Características do Solo.....	44
2.7.2	Tipo e Teor de Cal.....	45
2.7.3	Energia de Compactação	46
2.7.4	Teor de Umidade	46
2.7.5	Condições de Cura.....	47
2.8	PROPRIEDADES ALTERADAS PELA ADIÇÃO DE CAL AO SOLO.....	48
2.8.1	Parâmetros de Compactação.....	48
2.8.2	Plasticidade	48
2.8.3	Volumetria	49
2.8.4	Resistência.....	49
2.8.5	Durabilidade	50
2.8.6	Fadiga	53
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	54
3.1	MATERIAIS.....	56
3.1.1	Solo.....	56
3.1.2	Cales.....	57
3.2	MÉTODOS	60
3.2.1	Caracterização física, geotécnica e química do solo.....	60
3.2.2	Seleção dos teores de cal	61

3.2.3	Compactação.....	62
3.2.4	Moldagem dos corpos de prova para ensaios de RCS e RCD.....	63
3.2.5	Ensaio para determinação da resistência mecânica	65
3.2.6	Ensaio para avaliação da evolução das reações cimentantes.....	71
3.2.7	Análises mecanísticas	74
4	RESULTADOS.....	85
4.1	Análise do solo.....	85
4.1.1	Análise Química do solo.....	85
4.1.2	FRX.....	86
4.1.3	Caracterização física do solo	87
4.2	Dosagem das misturas	90
4.3	Ensaio de compactação	93
4.4	Ensaio para determinação da resistência mecânica.....	95
4.4.1	Resistência à compressão simples (RCS).....	95
4.4.2	Resistência à tração por compressão diametral (RCD).....	99
4.4.3	Resistência à Tração na Flexão (RTF)	105
4.5	Análise da evolução das reações cimentantes.....	109
4.5.1	Análises MEV	109
4.5.2	Análises DRX.....	115
4.6	ANÁLISES MECANÍSTICAS DE PAVIMENTOS COM CAMADAS SOLO-CAL 123	
4.6.1	Análises das Estruturas.....	123

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS e sugestões	127
5.1	CONCLUSÕES	127
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema da troca Catiônica.....	36
Figura 2: Fluxograma dos procedimentos metodológicos da pesquisa	55
Figura 3: Localização da Jazida do Argissolo	56
Figura 4: Argissolo utilizado na pesquisa.....	57
Figura 5: Cales utilizadas, a) calcítica e b) dolomítica.....	58
Figura 6: Amostras para realização do ensaio método do pH	61
Figura 7: Realização do ensaio do pH	62
Figura 8: Moldagem dos corpos de prova de solo-cal.....	64
Figura 9: Corpos de prova de solo-cal com dimensões de 5x10 cm	65
Figura 10: Corpo de prova de solo-cal após do ensaio de RCS	66
Figura 11: Corpo de prova de solo-cal após ensaio de RCD.....	68
Figura 12: Passo a passo da moldagem das vigotas de solo-cal	69
Figura 13: Configuração do Ensaio RTF.....	70
Figura 14: Metalização das amostras para análise MEV.....	73
Figura 15: Fluxograma para pré-dimensionamento de pavimentos contendo camadas de solos tropicais estabilizados com cal	75
Figura 16: Fluxograma da sequência das análises mecánísticas	76
Figura 17: Estrutura 1 - pavimento semirrígido invertido (sub-base em solo-cal).....	77
Figura 18: Estrutura 2 – pavimento semirrígido (base e sub-base em solo-cal).....	77
Figura 19: Estrutura 3 – pavimento semirrígido (base em solo-cal)	77

Figura 20: Granulometria do solo em estudo	88
Figura 21: Curvas de compactação Mini-MCV	89
Figura 22: Curvas de deformabilidade Mini-MCV	90
Figura 23: Classificação MCT do solo	90
Figura 24: Limites de Atterberg para SP e Mistura CD	91
Figura 25: Limites de Atterberg para SP e Mistura CC	91
Figura 26: Resultados da dosagem pelo Método do pH.....	93
Figura 27: Curvas de compactação na energia modificada: solo-cal calcítica, solo-cal dolomítica e solo puro	94
Figura 28: RCS das misturas solo-cal em função do tempo de cura	95
Figura 29: Gráfico dos efeitos principais para a RCS das misturas solo-cal.....	96
Figura 30: Gráfico de interações para a RCS de misturas solo-cal	97
Figura 31: Gráfico de contorno de RCS <i>versus</i> cura e teor para misturas com CC	98
Figura 32: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a RCS de misturas solo-cal.....	99
Figura 33: RCD das misturas solo-cal em função do tempo de cura	100
Figura 34: Gráfico dos efeitos principais para a RCD das misturas solo-cal	101
Figura 35: Gráfico de interações para a RCD das misturas solo-cal.....	102
Figura 36: Gráfico de Contorno de RCD <i>versus</i> cura e teor para misturas com CC.....	103
Figura 37: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a RCD das misturas solo-cal ...	103
Figura 38: Relação entre RCD e RCS para as misturas solo-cal.....	104
Figura 39: Comparativo dos resultados de RTF das misturas solo-cal	105

Figura 40: Curvas tensão de tração normalizada por deformação para as misturas de Argissolo com cal.....	106
Figura 41: Comparativo da deformação na ruptura das misturas solo-cal	107
Figura 42: Variação do módulo de elasticidade na flexão com o acréscimo de tensão durante o ensaio	108
Figura 43: Comparativo do módulo de elasticidade na flexão das misturas solo-cal	108
Figura 44: Análises MEV com ampliação de 3000x para o solo e as misturas aos 7, 90 e 120 dias de cura	110
Figura 45: Análises MEV com ampliação de 500x para as misturas CC 5% e CD 5% com 90 dias de cura	112
Figura 46: Análise MEV com ampliação de 1500x para as misturas CC 5% e CD 5% com 120 dias de cura	113
Figura 47: Imagens MEV utilizadas para a análise EDS com ampliação de 5000x	114
Figura 48: Análise de DRX do solo puro	116
Figura 49: Análises DRX das misturas de solo e cal calcítica	118
Figura 50: Comparação entre os resultados de DRX do SP e da mistura CC5% aos 180 dias de cura	120
Figura 51: Comparação entre os resultados de DRX do SP e da mistura CD5% aos 180 dias de cura	122
Figura 52: $N_{\text{crítico}}$ das análises para a Estrutura 1	124
Figura 53: $N_{\text{crítico}}$ das análises para a Estrutura 2.....	125
Figura 54: $N_{\text{crítico}}$ das análises para a Estrutura 3.....	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Pesquisas realizadas na década de 1960 nos Estados Unidos	27
Tabela 2: Pesquisas com misturas solo-cal realizadas no Brasil	28
Tabela 3: Algumas características do horizonte A dos Argissolos	34
Tabela 4: Descrição e nomenclatura das misturas solo-cal estudadas.....	54
Tabela 5: Número de amostras por mistura.....	55
Tabela 6: Exigências físico-químicas da DNIT-ME 418	58
Tabela 7: Caracterização das cales	59
Tabela 8: MEF obtidos e calculados.....	79
Tabela 9: Coeficientes e significância do modelo composto para determinação do MR do argissolo <i>in natura</i>	80
Tabela 10: Características dos materiais empregados nas análises mecânicas.....	80
Tabela 11: Características dos materiais consideradas nas análises mecânicas	81
Tabela 12: Análise Química do solo.....	85
Tabela 13: Análise por FRX semi-quantitativa	87
Tabela 14: frações granulométricas conforme a NBR 6502.....	88
Tabela 15: Parâmetros ótimos de compactação.....	94
Tabela 12: Média das análises EDS por área	114
Tabela 17: Valores de RCD para as misturas de solo-cal	148
Tabela 18: Resultados das análises mecânicas para Estrutura 1, CC5%	151
Tabela 19: Análises Mecânicas para Estrutura 1, CD5%	152

Tabela 20: Análises Mecánísticas para Estrutura 2, CC5%	153
Tabela 21: Análises Mecánísticas para Estrutura 2, CD5%	154
Tabela 22: Análises Mecánísticas para Estrutura 3, CC5%	155
Tabela 23: Análises Mecánísticas para Estrutura 3, CD5%	156

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO – *American Association of State Highway Transportation Officials*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AEMC – Análise Elástica de Múltiplas Camadas

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

BGS – Brita Graduada Simples

CA – Concreto Asfáltico

CaO – Óxido de Cálcio

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

DAER/RS – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul

DRX – Difractometria de raios X

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EDS – Espectroscopia por energia dispersiva

FQP – Fadiga em Quatro Pontos

FRX – Fluorescência de raios X

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IP – Índice de Plasticidade

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

LFP – *Lime Fixation Point*

LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*

MEF – Módulo Estático na Flexão

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MgO – Óxido de Magnésio

MR – Módulo de Resiliência

NCHRP – *National Cooperative Highway Research Program*

RCS – Resistência à Compressão Simples

RCD – Resistência à Tração por Compressão Diametral

ROLAS - Rede Oficial de Laboratórios de Análises de Solos

RTF – Resistência à Tração na Flexão

SAMEDM – *South African Mechanistic-Empirical Design Method*

SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

SP – Solo Puro

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos

1 INTRODUÇÃO

O modal rodoviário tem crescido substancialmente desde a década de 1950, sendo hoje o mais utilizado para transporte de cargas no Brasil. Em consequência disso, as solicitações nas camadas constituintes do pavimento são cada vez maiores, requerendo que a forma de dimensionamento e escolha dos materiais seja modificada visando maior capacidade de suporte. Como isso não ocorre, o excesso de cargas acaba por provocar a degradação precoce dos pavimentos.

A busca pela obtenção de pavimentos mais duráveis com revestimentos asfálticos de elevada vida de fadiga também aumenta e por consequência a procura por camadas inferiores (base e sub-base) constituídas por materiais mais resistentes e de melhor comportamento mecânico. Essa procura promove a minimização das solicitações de tração na fibra inferior e também diminuição das deformações na camada de revestimento. O emprego da cal em camadas inferiores, em adição ao solo existente, é capaz de proporcionar melhorias na capacidade de suporte e resistência à tração. A cal causa efeitos em outras características não permanentes como a melhoria da trabalhabilidade ou secagem.

A necessidade de que os pavimentos sejam ambientalmente sustentáveis e capazes de suprir as expectativas econômicas, gerando menores gastos com melhor desempenho torna-se uma demanda básica da pavimentação. Diante disso, o emprego da cal visando a modificação e estabilização de solos surge como um potencial aliado nesses quesitos.

Um problema observado nas obras rodoviárias é a inaptidão do solo existente. Dessa forma, a utilização da cal para melhoramento e estabilização de solos minimiza um problema trazido pelas distâncias entre as jazidas de solos e agregados, e as obras rodoviárias, tendo em vista que a substituição do material local por outro torna-se reduzida.

A logística supracitada também reduz a necessidade de um bota-fora para colocação do material local, e o conseqüente gasto com combustível e equipamentos para retirada e transporte do solo local. Além da economia de custos e redução na emissão de gases oriundos do transporte dos materiais da jazida para o local da obra e do local da obra para o bota-fora.

O emprego desta técnica no Brasil ainda é limitado e se destacam como as principais dificuldades acerca da sua propagação: a falta de divulgação dentro do meio técnico, dúvidas existentes a respeito da dosagem das misturas, ensaios mecânicos e procedimentos construtivos.

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Pesquisas anteriores demonstram a afinidade de solos tropicais com a cal, sendo possível o melhoramento e a estabilização de solos tropicais para utilização em camadas de base e sub-base. É importante ressaltar também o clima favorável às reações químicas entre o solo e a cal na região de estudo (Rio Grande do Sul), cujo clima é tropical.

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) possui 13 classes, dentre as quais há grande variabilidade química, física e morfológica. A classe dos Argissolos representa aproximadamente 24% da superfície do Brasil, ocupando a segunda posição em termos de extensão territorial, segundo dados da EMBRAPA, apresentados por Santos *et al.* (2013).

Nesse sentido, a presente pesquisa apresenta o estudo de um argissolo estabilizado com cal com base na classificação brasileira de solos, ainda pouco difundida na pavimentação. Salienta-se que o estudo faz parte de uma pesquisa mais ampla de misturas solo-cal considerando essa classificação.

A inexistência de parâmetros para dimensionamento mecanístico é um dos principais problemas acerca da utilização da técnica. Além disso, existem lacunas no conhecimento microestrutural e mineralógico para solos tropicais estabilizados com cal

1.2 OBJETIVO PRINCIPAL

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico, microestrutural e mineralógico de um argissolo estabilizado com cal.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são descritos a seguir:

- I. Avaliar a influência do teor e do tipo de cal (calcítica e dolomítica), tempos de cura e teores no comportamento mecânico de misturas solo-cal das misturas;
- II. Analisar a evolução das reações que geram os produtos cimentantes por meio de ensaios microestruturais e mineralógicos;
- III. Obtenção de parâmetros para dimensionamento mecanístico de camadas solo-cal;
- IV. Realizar análises mecanísticas de pavimentos com camadas solo-cal com os parâmetros de dimensionamento mecanísticos obtidos.

1.4 LIMITAÇÕES

As limitações desse trabalho consistem na utilização de somente uma classe de solo (Argissolo) e no fato desse material apresentar diferentes comportamentos dentro da classe definida como “argissolos” dentro do SiBCS (Sistema Brasileiro de Classificação de Solos).

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O primeiro capítulo trata-se de uma breve introdução à pesquisa realizada, indicando objetivos gerais e específicos. Tal capítulo busca contextualizar e indicar a relevância do assunto abordado, bem como apresentar a lacuna de conhecimento estudado.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica da pesquisa, com importantes definições para a estrutura da dissertação, destacando a importância do tema abordado e conceitos relevantes. Esse capítulo também busca indicar parâmetros para posterior análise dos resultados obtidos.

Os materiais e a metodologia utilizados na pesquisa são apresentados no capítulo três, que tem como principal função esclarecer a matriz experimental e como a pesquisa foi desenvolvida.

No capítulo quatro são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir da metodologia proposta. No capítulo cinco são apresentadas as análises mecanísticas e no seis as considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo é realizada uma abordagem teórica a respeito da história da utilização da cal no Brasil e no mundo. Também são apresentadas questões relacionadas com aspectos químicos e físicos que envolvem as reações do tipo solo-cal. O capítulo estabelece algumas definições importantes para o desenvolvimento da pesquisa, explicando a importância do tema desenvolvido, apresentando os parâmetros existentes para avaliação do experimento a ser realizado, e também as pesquisas já desenvolvidas sobre o tema, que servirão como apoio para definições pertinentes no decorrer da pesquisa.

Na década de 60, Anday (1961) observou que o cimento não poderia ser utilizado com tanto sucesso em solos coesivos como em solos granulares, desse modo, iniciaram-se os primeiros estudos científicos da interação do solo com a cal. Constatou-se inicialmente que o ganho de resistência de misturas do tipo solo-cal dependia do tipo de solo e do clima da região, não devendo esperar grande interação entre o solo e a cal quando condicionados a temperaturas abaixo de 10 °C.

Foi verificado que a falha das camadas estabilizadas com cal podia ocorrer de três maneiras: a) por trincamento – nem sempre visível na superfície do pavimento, b) pela deformação – procedida inevitavelmente pelo trincamento e c) pela desagregação do material em uma massa solta – estado granular (BULMAN, 1972).

Para fins de dimensionamento de materiais cimentados, são considerados três fatores: a) efeito do trincamento por retração (variações térmicas e do teor de umidade), b) efeito da fadiga e propagação das trincas no material (devido aos esforços repetidos do tráfego) e c) possível deformação cisalhante da camada no estado equivalente ao granular (LOVATO, 2004).

Alguns pesquisadores também abordaram o emprego da cal tendo em vista a mudança no teor de umidade em subleitos argilosos. Prusinski e Bhattacharkja (1998) indicam a possibilidade de ocorrência de mudanças volumétricas capazes de causar instabilidade no pavimento, resultando em superfícies irregulares, trincamento, e por fim, a deterioração prematura da estrutura. Para solução desse problema, os autores indicam a escavação e substituição do material argiloso por outro material ou, o aumento da camada da base com o intuito de diminuir as tensões que chegam ao subleito do pavimento e dessa forma, minimizar as

mudanças causadas pela umidade. Nesse caso, agentes estabilizadores como a cal e o cimento Portland apresentam-se como soluções eficazes para a modificação das propriedades e/ou estabilização desses solos.

2.1 HISTÓRICO DA UTILIZAÇÃO DA CAL NO MUNDO

Os primeiros registros arqueológicos da utilização da cal são datados do período Paleolítico (34 mil a 12 mil a.C.), supõe-se que pinturas rupestres realizadas na Gruta de Lascaux, Vale do Vegère (França) foram desenhadas com cal oriunda de queima do calcário local. Embora existam evidências da utilização da cal ao longo da maior parte da existência humana, foi somente na civilização egípcia que o material começou a aparecer com maior frequência, sendo utilizado como aglomerante nas construções, existindo diversos registros de análises de argamassas com presença de cal no período dessa civilização, como por exemplo: a Pirâmide de Quéops (2700 a.C.) e a pirâmide do faraó egípcio Tutancâmon (1450 a.C.). Depois da disseminação do uso da cal na civilização egípcia, o emprego desse material expandiu-se territorialmente para a Grécia, Roma e outras regiões mediterrâneas. (GUIMARÃES, 1997).

Na pavimentação, os Romanos foram os precursores na utilização da cal, utilizando-a na construção de sub-bases (HERRIN; MITCHELL, 1961). Tratava-se da Via Ápia, estrada concebida em 312 a.C, composta por quatro camadas, sendo duas dessas camadas construídas com a adição de cal hidratada (GUIMARÃES, 1997).

Na era Moderna, na antiga União Soviética, houveram registros de estudos realizados em 1926 com um solo argiloso proveniente do País de Gales. A pesquisa verificou a redução da plasticidade com a adição de 5% de cal hidratada (BIRULYA, 1955 *apud* CLARE; CRUCHLEY, 1957). Mais tarde, na década de 1950, Clare e Cruchley (1957) apresentaram um estudo de um solo argiloso do Reino Unido e cal hidratada no qual observaram as reações de floculação e formação de produtos cimentantes.

No entanto, a técnica já vinha sendo empregada em rodovias nos Estados Unidos desde a década de 1920. No ano de 1924, a *Bureau of Public Roads* em parceria com o Departamento de Rodovias do Estado de Iowa construiu um trecho experimental com 17 diferentes seções, nas quais foi feito o tratamento do solo com cal hidratada e cimento Portland, com variações dos teores de 3 a 9%. Após um período em que o trecho ficou suscetível ao congelamento, foi

observado que as condições de tráfego, houve menor absorção de água e a superfície apresentava-se mais “seca” do que aquelas sem nenhum tratamento (ROSE, 1926).

Somente a partir de 1960 que a técnica começou a ser efetivamente difundida no meio científico através de pesquisadores nos Estados Unidos. A Tabela 1 apresenta um compilado de artigos precursores publicados durante esse período no antigo periódico *Highway Research Record*.

Tabela 1: Pesquisas realizadas na década de 1960 nos Estados Unidos

Ano	Pesquisadores	Estado	Título
1960	Eades e Grimm	Illinois	Reaction of Hydrated Lime With Pure Clay Minerals in Soil Stabilization
1961	Anday	Virgínia	Curing Lime-Stabilized Soils
1961	Herrin e Mitchel	Illinois	Lime-Soil Mixtures
1961	Hilt e Davidson	Iowa	Lime Fixation in Clayey Soils
1961	Remus e Davidson	Iowa	Relation of Strength to Composition and Density of Lime-Treated Clayey Soils
1962	Mateos e Davidson	Iowa	Comparative Effects of Hydraulic, Calcitic And Dolomitic Limes and Cement in Soil Stabilization
1962	Pietsch e Davidson	Iowa	Effects of Lime on Plasticity and Compressive Strength of Representative Iowa Soils
1962	Wang, Davidson, Rosauer e Mateos	Iowa	Comparison of Various Commercial Limes for Soil Stabilization
1963	Wang, Mateos e Davidson	Iowa	Comparative Effects of Hydraulic, Calcitic And Dolomitic Limes and Cement in Soil Stabilization
1963	Glenn e Handy	Illinois	Lime-Clay Mineral Reaction Products
1963	Miller e Couturier	Pensilvânia	Measuring Thermal Expansion of Lime-Fly Ash-Aggregate Compositions Using SR-4 Strain Gages
1963	Ho e Handy	Iowa	Characteristics of Lime Retention by Montmorillonitic Clays
1963	Jan e Walker	Carolina do Norte e Virgínia	Effect of Lime, Moisture and Compaction on a Clay Soil
1965	Davidson, Demirel e Handy	Iowa	Soil Pulverization and Lime Migration Soil-Lime Stabilization
1965	Diamond e Kinter	Departamento de Estradas dos Estados Unidos	Mechanisms of Soil-Lime Stabilization
1965	Laguros	Oklahoma	Lime-Stabilized Soil Properties and the Beam Action Hypothesis
1965	Hoover	Iowa	Evaluation of Experimental Stabilized Soil Base Construction, Webster County, Iowa
1966 a	Thompson	Illinois	Lime reactivity of Illinois soils
1966 b	Thompson	Illinois	Split-Tensile Strength of Lime-Stabilized Soils
1966 c	Thompson	Illinois	Shear strength and elastic properties of lime-soil mixtures
1967	Thompson	Illinois	Factors influencing the plasticity and strength of lime-soil mixtures
1969	Thompson e Dempsey	Illinois	Autogenous Healing of Lime-Soil Mixtures

2.2 A UTILIZAÇÃO DA CAL NO BRASIL

No Brasil, os estudos com misturas do tipo solo-cal no âmbito acadêmico têm os primeiros registros datados em 1977 com dois trabalhos de mestrado, sendo um de autoria de Marcon (1977) intitulado: “Durabilidade e Módulo de Elasticidade de Misturas Areia-Cal e Cinza Volante” e outro de autoria de Costa (1977) intitulado: “Resistência ao cisalhamento de uma argila mole estabilizada com cal (CaO)”.

Posteriormente foram desenvolvidos outros trabalhos de mestrado e doutorado empregando misturas com solo, cal e também outros aditivos, como por exemplo, a cinza volante. A Tabela 2 apresenta uma cronologia dos estudos realizados a nível nacional até o momento.

Tabela 2: Pesquisas com misturas solo-cal realizadas no Brasil

Título	Autor (a)	Tipo	Orientador (a)	Instituição	Ano
Estabilização de areia com cinza volante e cal; efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura	NARDI, J. V.	M	MEDINA, J.	UFRJ	1975
Durabilidade e Módulo de Elasticidade de Misturas Areia-Cal-Cinza Volante	MARCON, A. F.	M	MEDINA, J.	UFRJ	1977
Resistência ao cisalhamento de uma argila mole estabilizada com cal (CaO)	COSTA, M. A.	M	BAUER, G. E.	UFPB	1977
Estudo da permeabilidade e estrutura de solo-cal	SILVEIRA, J.	M	MEDINA, J.	UFRJ	1979
Efeitos da Adição de Cal e Cinza Volante nas Propriedades de um Solo Residual Compactado	CERATTI, J. A. P.	M	MILITITSKY, J.	UFRGS	1979
Influência da cal (envelhecimento) na estabilização de solos lateríticos	MAIOR, I. S.	M	FERREIRA, H. C.	UFPB	1983
Contribuição ao estudo da estabilização de solos tropicais com adição de cal para fins rodoviários	NÓBREGA, M. T.	M	CARVALHO, A.	USP	1988
Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação	NÚÑEZ, W. P.	M	MILITITSKI, J.	UFRGS	1991
Caracterização e Estabilização com Cal de uma Argila Mole do Manguê de João Pessoa	COSTA, C. M.	M	FERREIRA, H. C.	UFPB	1992
Estudo do comportamento de um solo mole tratado com cal, visando seu uso em fundações superficiais	THOMÉ, A. T.	M	CERATTI, J. A.	UFRGS	1994
Contribuição ao Conhecimento e à determinação da reatividade de solos sesquioxídicos utilizando o hidróxido de cálcio: aplicação ao processo de geopolimerização (estabilização)	CASTRO, F. J. C. O.	D	MEDINA, J.	UFRJ	1995
Estabilização do solo da região de São Pedro de Alcântara - SC com cal visando o seu emprego na Pavimentação	POMATTI, K. E.	M	SANTOS, G. T.	UFSC	2000
Módulo de resiliência de Misturas Solo-Alcátrão, Solo-Cal, Alcátrão e Solo-Cimento-Alcátrão para pavimentação de Estradas Florestais	SANT'ANNA, G. L.	D	MACHADO, C. C.	UFV	2002
Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação	LOVATO, R. S.	M	NÚÑEZ, W. P.	UFRGS	2004
Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas de Fosfogesso e Cal para Utilização na Construção Rodoviária	OLIVEIRA, S. M. F.	M	PEREIRA, A. B.	USP	2005
Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para utilização em estruturas de pavimentos	ROQUE, P. F. B.	M	CARVAHO, J. C.	UNB	2006
Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada	LOPES, L. S. J.	M	CONSOLI, N. C.	UFRGS	2007
Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na pavimentação	MACHADO, A. K. C. M.	D	CARVALHO, J. C.	UFB	2007

Rodoviária					
Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: Mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica	PORTELINHA, F. H. M.	M	CALIJURI, M. L.	UFV	2008
Avaliação das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação	CORRÊA, J. F.	M	MARCON, A. F.	UFSC	2008
Estudo Laboratorial de Misturas de Fosfogesso, solo tropical e cal para fins de pavimentação	RUFO, R. C.	M	REZENDE, L. R.	UFG	2009
Avaliação de misturas de solos estabilizados com cal, em pó e em pasta, para aplicação em Rodovias do Estado do Ceará	ARAÚJO, A. F.	M	BARROSO, S. H. A.	UFC	2009
Estabilização de solos com adição de cal. Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal	AZEVEDO, A. L. C.	M	FERNANDES, G.	UFOP	2010
Emprego da cal na estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão: estudo de caso no município de Ribeirão das Neves/MG	OLIVEIRA, E.	M	TRICHÊS, G.	UFSC	2010
Avaliação do emprego da técnica de estabilização de solo na melhoria de estradas florestais da Região de Niquelândia-GO	EMMERT, F.	M	PEREIRA, R. S.	UFB	2010
Estudo de Alguns Fatores que Podem Afetar a Durabilidade de Misturas Solo-Cal	BUENO, E. S.	M	NÚÑEZ, W. P.	UFRGS	2011
Metodologia de Previsão do Comportamento Mecânico de Solos Tratados com Cal	LOPES, L. S. J.	D	CONSOLI, N. C.	UFRGS	2011
Análise de um pavimento semirrígido com base em solo, cal e cinza volante	TABORDA, L. F.	M	NÚÑEZ, W. P.	UFRGS	2012
Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal	BARBOSA, V.	M	FERREIRA, S. R. M.	UFPE	2013
Considerações sobre misturas de solos tropicais estabilizados quimicamente para uso como camada de pavimento urbano	MALANCONI, M.	M	FERREIRA, M. A. G.	UFSCar	2013
Melhoramento de um solo mole orgânico com o uso de cimentação	WINTER, D.	M	CONSOLI, N. C.	UFRGS	2013
Análise Estrutural de Pavimentos de Baixo Volume de Tráfego Revestidos com Solo Modificado com Cal Considerando Ensaios Laboratoriais e Monitoramento de Trechos Experimentais	BEHAK, L.	D	NÚÑEZ, W. P.	UFRGS	2013
Influência da Temperatura de Cura no Comportamento Mecânico de Misturas de Areia-Cinza Volante-Cal	SILVANI, C.	M	CONSOLI, N. C.	UFRGS	2013
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	JOHANN, A. D. R.	D	CONSOLI, N. C.	UFRGS	2013
Durabilidade, Rigidez e Avaliação do Ciclo de Vida de um Solo Dispersivo Estabilizado com Cal	VILLALBA, N. M. K.	M	CONSOLI, N. C.	UFRGS	2015
Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal	QUIÑÓNEZ SAMANIEGO, R. A.	M	CONSOLI, N. C.	UFRGS	2015
Comportamento hidráulico e mecânico de um solo residual tratado com cal	BENETTI, M.	M	CONSOLI, N. C.	UFRGS	2015
Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico	SILVA, M. F.	M	FURLAN, A. P.	USP	2016
Estudo do Comportamento Geomecânico dos solos expansivos dos municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca - PE e de suas misturas com Cal	PAIVA, S. C.	D	FERREIRA, S. R. M.	UFPE	2016
Estudo Laboratorial de um Solo Tropical Granular Estabilizado Quimicamente para fins de Pavimentação	ROCHA, M. T.	M	REZENDE, L. R.	UFG	2016
Behavior of a Lime-Treated Expansive Soil	BELCHIOR, I. M. R. M.	D	CASAGRANDE, M. D. T.	PUC-RIO	2016
Estudo de dois solos tropicais melhorados com cimento ou cal para emprego em camadas superiores de estradas não pavimentadas	JOAQUIM, A. G.	M	PIVA, C. E. L.	Unicamp	2017
Contribuição ao estudo da dosagem de cal para a estabilização de um solo de comportamento laterítico de um não laterítico	MEDEIROS, A. A. L.	M	FURLAN, A. P.	USP	2017

Estudo de campo e laboratório do comportamento mecânico de um solo sulfatado estabilizado com cal	MARÍN, E. J. B.	M	CONSOLI, N. C.	UFRGS	2017
Solos Artificialmente Cimentados em Célula Cúbica: Isotropia a Pequenas Deformações e na Ruptura	SILVANI, C.	D	CONSOLI, N. C.	UFRGS	2017
Comportamento Mecânico com resíduos industriais, sob flexão a quatro pontos, para construção de pavimentos flexíveis	LIMA, C. A. P.	M	FROTA, C. A.	UFAM	2017
Estudo do comportamento geotécnico de um solo potencialmente expansivo, encontrado em Agrestina/PE, aplicando cinza de casca de arroz e cal como aditivos estabilizantes	SILVA, J. A.	M	BELLO, M. I. M. C. V.	UFPE	2018
Efeito da cal na resposta mecânica de um solo residual maduro: análise da resistência à compressão não confinada, permeabilidade, compressibilidade e efeito da cura acelerada na resistência mecânica	ROCHA, G. S.	M	LIMA, D. C.	UFV	2018
Controle da expansão dos solos com resíduos de mármore e cal	TENÓRIO, E. A. G.	M	LUCENA, L. C. F. L.	UFCG	2019
Estabilização de solos tropicais com cal e impactos no dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos	KLEINERT, T. R.	D	NÚÑEZ, W. P.	UFRGS	2021

Percebe-se um grande número de trabalhos realizados no Brasil, todavia ressalta-se que poucos deles abrangem o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) e oferecem contribuições acerca do estudo de fadiga em escala laboratorial.

Em relação a trechos experimentais realizados com adição de cal são destacados alguns trechos em rodovias, avenidas e aeroportos:

- Trecho de solo siltoso com 3 e 7% de cal, extensão de 1000 m no estado do Paraná (GUIMARÃES, 1971).
- Trecho de 18 km na Avenida Sernambetiba, Rio de Janeiro, com base de solo-cal (teores de 3 e 4%) (GUIMARÃES, 1971).
- Trechos experimentais localizados na BR-377, datados da década de 1960 e 1970 com base e sub-base de solo laterítico e cal (LOVATO, 2004).
- Dois trechos experimentais relatados por Pessoa (2012): um deles sendo composto por base de solo com adição de 2% de cal e tendo extensão de 80 metros, e outro composto por base de solo com adição de 6% de cal e sub-base de solo com 3% de cal, e tendo com extensão de 60 metros.
- Duplicação da autopista Fluminense (BR-101/RJ), em 2015, foi utilizada uma mistura com adição de 3% de cal calcítica do tipo CH-I como camada de reforço e/ou sub-base.

2.3 CLASSIFICAÇÃO PEDOLÓGICA

O SiBCS baseia-se na pedologia dos materiais e busca definir um sistema hierárquico, multicategórico e aberto, permitindo a inclusão de novas classes, viabilizando a classificação de qualquer solo encontrado em território nacional. O SiBCS é o sistema taxonômico oficial de classificação de solos do Brasil (SANTOS *et al.*, 2013). Em sistemas taxonômicos, a terminologia “solo” refere-se a todas as partes de um perfil de solo presente acima do material de origem (camadas e horizontes genéricos) (IBGE, 2007).

De acordo com a pedologia, o solo pode ser definido como um material natural composto por matéria orgânica e minerais, geralmente não consolidado, distinguido por horizontes, que diferenciam-se do material genético inferior da seção em morfologia, características biológicas, constituição, e propriedades físicas (BALBO, 2007).

Em campo, a descrição do solo é entendida como sendo o registro das características por meio da análise do perfil do solo em seu meio natural. Dessa forma, o estudo *in loco* deve incluir a delimitação dos horizontes e camadas, com identificação e registro das características morfológicas individuais, caracterização da transição entre horizontes/camadas, espessura, textura, estrutura, cor, consistência e demais características (IBGE, 2007).

No SiBCS, os horizontes genéticos (pedogênicos), nem sempre são diagnósticos de classes de solos. Para que os horizontes sejam identificados como pertencentes a alguma classe em algum nível categórico, para boa parte deles são estabelecidas condições quase sempre relativas à espessura (IBGE, 2007).

Conforme o estabelecido pelas diretrizes da EMBRAPA, o limite inferior de determinada seção de solo com finalidade de classificação pelo SiBCS deve ser fixado em aproximadamente 200 cm. No caso do horizonte A exceder 150 cm de espessura, o limite arbitrado é de 300 cm. E se, o horizonte E somado com o horizonte A for igual ou maior que 200 cm (aplica-se exclusivamente para classe dos Espodosolos), o limite arbitrado é de 400 cm (SANTOS *et al.*, 2013). Entende-se como camada uma seção localizada na superfície do terreno ou paralela a esta, com características não resultantes, ou pouco influenciadas pela atuação de processos pedogenéticos, de constituição mineral ou orgânica (IBGE, 2007).

2.4 ARGISSOLOS

Os argissolos ocupam uma extensão territorial de 1.720.000,00 km², cerca de 20% da área total do país, sendo a segunda maior classe de solo em termos de extensão territorial e ficando atrás apenas dos latossolos (38,73%). Na região Sul, o percentual ocupado por essa classe é de 14,77%, ocupando a terceira posição, ficando atrás dos latossolos (24,96%) e neossolos (23,23%) (MANZATTO *et al.*, 2002).

A classe argissolo é comum a solos com processo de acumulação de argila de atividade baixa ou alta, desde que aliada à saturação por bases baixa ou com caráter alumínico. Essa classe possui profundidade variável (em geral pouco profunda), podendo ser forte ou imperfeitamente drenada, com cores oscilando entre amarelado e avermelhado, sendo raramente acinzentadas ou brunadas (SANTOS *et al.*, 2013). Normalmente ocupam relevos moderadamente íngremes (LIMA *et al.*, 2012).

No horizonte A, sua textura varia de arenosa a argilosa, e no horizonte B de média a muito argilosa, sempre havendo aumento de argila do horizonte A para o B. A transição entre os horizontes A e Bt (sendo o sufixo t utilizado exclusivamente para o horizonte B para indicar a acumulação/concentração de argila) é comumente abrupta (menor que 2,5 cm), clara (entre 2,5 e 7,5 cm) ou gradual (7,5 e 12,5 cm) (SANTOS *et al.*, 2013). As cores do horizonte A são sempre mais escuras, e as do horizonte Bt variam de acinzentadas a avermelhadas (IBGE, 2007).

No caso do Rio Grande do Sul, foram identificados Argissolos: Vermelhos, Vermelhos-Amarelos, Bruno-Acinzentados, Acinzentados e Amarelos, conforme a cor predominante no horizonte B textural que diz respeito ao segundo nível categórico do SiBCS. No próximo nível categórico (terceiro), os argissolos podem ser diferenciados por suas características químicas: distróficos (saturação por bases < 50%), eutróficos (saturação por bases \geq 50%), alíticos (Al extraível \geq 4 cmol/kg, saturação por Al \geq 50% e atividade de argila \geq 20 cmol/kg de argila) e alumínicos (Al extraível \geq 4 cmol/kg, saturação por Al \geq 50% e atividade de argila < 20 cmol/kg de argila). No quarto nível categórico, os argissolos que apresentam mudança textural abrupta e horizontes A ou A+E de textura arenosa, são definidos como *arênicos* se o horizonte B inicia entre 50 e 100 cm de profundidade e como *espessarênicos* quando o horizonte B inicia em profundidade >100 cm. Entretanto, os argissolos com mudança textural abrupta, mas sem textura arenosa nos horizontes A ou A+E, constituem os

abrúpticos. Os Argissolos que apresentam além do horizonte B textural ainda algumas características de horizonte B *latossólico* são considerados como intermediários para a classe dos Latossolos, sendo definidos como *latossólicos*. Já os solos que apresentam um horizonte A significativo são denominados *úmbricos*. Os *plínticos* são aqueles que apresentam um horizonte *plíntico* em profundidade maior do que a requerida para a classe Plintossolo (STRECK *et al.*, 2008).

Os argissolos são bastante susceptíveis à erosão, especialmente em terrenos íngremes. Muitos problemas relacionados à erosão no noroeste do estado do Paraná ocorrem nesse tipo de solo (LIMA *et al.*, 2012). Na região norte do país, os solos com maior potencial erosivo ocorrem em relevos mais dissecados, onde há ocorrência de cambissolos, luvisolos e argissolos (MANZATTO *et al.*, 2002). Os autores indicam que na região sul ocorre a predominância de solos com alta e muito alta susceptibilidade à erosão, como solos rasos: cambissolos e neossolos litólicos, e profundos: argissolos. No caso da região Sul, os três solos citados estão localizados em relevos acidentados das serras e planaltos sulinos (STRECK *et al.*, 2008).

As principais limitações nas características químicas dos Argissolos dizem respeito a esses serem distróficos (ou seja, terem saturação por bases inferior a 50%), alíticos e alumínicos (alta saturação por alumínio), e apresentarem forte acidez. Os argissolos originados do arenito possuem baixos teores de matéria orgânica e argila, e altos teores de areia, baixa capacidade de troca de cátions (T) e saturação por bases (SB), e elevado teor de alumínio extraível (Al^{3+}). Também são mais suscetíveis à erosão, pelo maior teor de areia. Já a fertilidade química dos argissolos originados do arenito é menor do que a dos argissolos originados de basalto. Por fim, um grau intermediário de fertilidade química entre os solos originados do arenito e basalto seriam aqueles que se originam do argilito, siltito e granito (STRECK *et al.*, 2008). Isso pode ser melhor visualizado na Tabela 3.

Tabela 3: Algumas características do horizonte A dos Argissolos

Classes de solos	Referência	Material de Origem	Frações Granulométricas			Carbono orgânico	SB	T	Al ³⁺
			Areia	Silte	Argila				
Argissolo Vermelho - Distrófico arênico	RS 128	Arenito	78	12	10	0,28	0,3	2,7	1,0
Argissolo Vermelho - Amarelo Distrófico típico	RS 71		79	8	13	0,56	1,0	4,1	1,2
Argissolo Vermelho - Amarelo Distrófico arênico abrupto	RS 107	Silito-arenito	68	24	8	0,72	1,1	4,3	0,8
Argissolo Vermelho - Amarelo Distrófico típico	RS 140	Silito	57	15	28	0,73	1,1	7,7	3,0
Argissolo Vermelho - Amarelo Distrófico típico	RS 1	Granito	47	22	31	1,16	3,3	8,5	1,1
Argissolo Vermelho - Amarelo Distrófico úmbrico	RS 117	Argilito	45	22	23	1	3,4	8,8	1,1
Argissolo Vermelho - Alítico abrupto	PIAR	Basalto	23	38	39	1,4	4,1	16,7	3,2
Argissolo Vermelho - Amarelo Distrófico abrupto	RS 127		35	35	30	1,95	9,0	14,6	0,3

Fonte: adaptado de Streck *et al.* (2008)

2.5 REAÇÕES SOLO-CAL

Os solos podem ser estabilizados ou melhorados com cal, dependendo de sua pedologia e como desenvolvem-se as reações físico-químicas.

A terminologia “melhoramento de solos”, em decorrência do baixo teor de aditivo empregado (ex.: cimento ou cal), não demonstra características para uso como base de pavimentos, tendo seu emprego como sub-base de pavimentos (NÚÑEZ, 1991). Solos melhorados ou modificados apresentam melhorias em propriedades, como: plasticidade, volumetria, textura e trabalhabilidade, sem aumento considerável na resistência. Já a terminologia “estabilização físico-química de solos” refere-se a solos com comportamento resiliente e capacidade de suporte superiores.

Os fatores que influenciam as reações entre o solo e a cal incluem quantidade de cal, condições de cura da mistura, propriedades naturais do solo, mineralogia da argila presente e pedologia (HARTY; THOMPSON, 1973). É importante ressaltar que solos coesivos respondem mais facilmente à cal do que solos granulares, informação já constatada em estudo precursor realizado por Clare e Cruchley (1957).

No caso de misturas solo-cal envolvendo climas tropicais e subtropicais, Harty e Thompson (1973) indicam que nenhuma propriedade do solo analisada isoladamente pode ser utilizada para prever com exatidão a interação de uma mistura. Os autores apontam que o índice de reatividade entre o solo e a cal deve ser baseado em pelo menos duas ou mais propriedades ou características do solo.

Existem dois estágios distintos nas reações do tipo solo-cal: a) as reações rápidas: responsáveis pelo melhoramento das propriedades sensíveis à água do solo; e b) as reações lentas: responsáveis pela formação dos produtos cimentantes. Os fenômenos observados nas “reações rápidas” são: troca catiônica, floculação-aglomeração, compressão da dupla camada, adsorção de cal e reações químicas (LITTLE, 1999).

As reações pozolânicas e a carbonatação fazem parte das chamadas “reações lentas”, tendo início depois de um maior período de tempo da adição da cal ao solo e, em presença de água, desenvolvem-se durante longo período de tempo. A carbonatação é responsável pela formação de carbonatos, tidos como produtos cimentantes “fracos”, podendo impedir a ação pozolânica e o ganho normal de resistência (HERRIN; MITCHELL, 1961). Já as reações pozolânicas são responsáveis pela formação de vários tipos de agentes cimentantes, e por consequência disso, do aumento da resistência até que haja cal e componentes do solo reativos no sistema (THOMPSON; DEMPSEY, 1969).

2.5.1 Trocas catiônicas

As trocas catiônicas são responsáveis pelo início do processo de estabilização, ocorrendo de forma muito rápida, geralmente dentro de algumas horas, fazendo parte do que são chamadas de “reações rápidas”. Posteriormente, são seguidas pelos fenômenos de floculação e aglomeração (DIAMOND; KINTER, 1965).

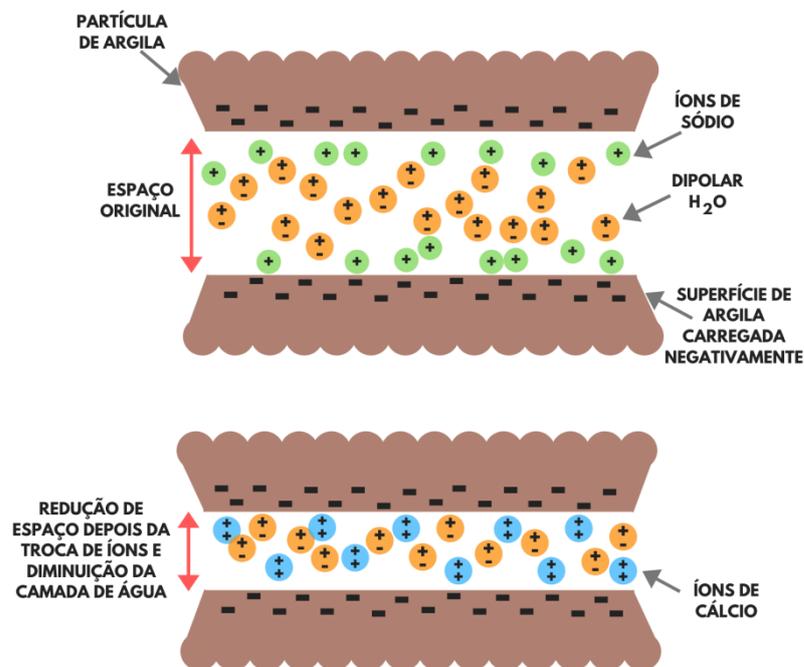
Quando se adiciona cal ao solo, ela se desassocia nos íons Ca^{2+} e OH^- . A liberação de íons de OH^- é responsável por elevar o pH para 12,4, possibilitando a dissolução da sílica e alumina encontradas nos minerais da argila para posterior combinação com os íons de Ca^{2+} (AKULA; LITTLE, 2020). A dissociação da cal é simplificada pela reação na Equação 1.



A adição de cal ao solo implica em um excesso de Ca^{++} (responsável por fornecer íons de cálcio) no solo, possibilitando a substituição dos cátions mais fracos (monovalentes) do complexo de troca do solo. Dessa forma, os cátions de maior valência substituem os de menor valência, e cátions maiores substituem os menores na mesma camada de valência (MALLELA *et al.*, 2004; PRUSINSKI; BHATTACHARJA, 1998). Nessa troca, é verificada a substituição de cátions trocáveis de sódio, magnésio e outros, anteriormente mantidos pela argila do solo, por cátions oriundos da cal adicionada na mistura (DIAMOND; KINTER, 1965).

A troca catiônica gera uma redução no tamanho da dupla camada difusa de água (conforme pode ser verificado na Figura 1), permitindo que as partículas de argila se aproximem mais umas das outras e posteriormente, floculem. O tamanho das partículas de solo influencia diretamente na taxa de dissolução da cal, conseqüentemente, as partículas menores entram na solução mais rapidamente, devido à maior área de superfície exposta (MALLELA *et al.*, 2004; PRUSINSKI; BHATTACHARJA, 1998)

Figura 1: Esquema da troca Catiônica



Fonte: adaptado de Prusinski e Bhattacharja (1998, p. 217)

2.5.2 Floculação e aglomeração

A partir das partículas de argila finamente divididas, a aglomeração possibilita a formação de agregados maiores, melhorando a textura de solos argilosos (DIAMOND; KINTER, 1965). Conforme apresentado por Zhao *et al.* (2015), a aglomeração de cátions ocorre na água presente nos poros do solo durante o estágio inicial do tratamento com cal, o que pode ser verificado pelo método de espectroscopia de absorção atômica que é capaz de indicar um aumento de Ca^{2+} e K^+ .

A aglomeração ocorre na medida em que as partículas de argila floculadas, começam a formar ligações fracas nas interfaces (bordas das superfícies) entre partículas do meio devido à deposição de materiais cimentícios (PRUSINSKI; BHATTACHARJA, 1998).

Dhar e Hussain (2019) verificaram uma tendência de diminuição da retração linear de acordo com o aumento na porcentagem de cal adicionada a um solo argiloso. Os autores indicam que essa tendência deve-se à diminuição da dupla camada difusa das partículas de argila em decorrência da substituição de cátions bivalentes de cálcio pelos íons metálicos do solo. Segundo Prusinski e Bhattacharja (1998), a redução da dupla camada difusa devido à troca catiônica e o aumento da resistência devido ao atrito interno entre as partículas de argila (oriundos da floculação e aglomeração), resultam no aumento da resistência ao cisalhamento e na melhora textural do solo.

Um estudo realizado por Vitale *et al.* (2017) avaliou a influência da mineralogia de duas diferentes argilas (caulinita e bentonita) quanto à reatividade com a cal virgem (CaO). A curto prazo (24 horas), notou-se uma diminuição significativa na superfície específica das amostras de caulinita, resultado da floculação. Contudo no caso da bentonita, essa redução foi bem mais significativa e abrupta.

2.5.3 Carbonatação

Chama-se de carbonatação a reação entre o dióxido de carbono (CO_2) do ar com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), formando o carbonato de cálcio (ou calcita) (HERRIN; MITCHELL, 1961; AKULA; LITTLE, 2020). Deneele *et al.* (2013) indicam que a formação de calcita pode ser resultado da carbonatação direta da cal hidratada, após a dissolução de CO_2 em água

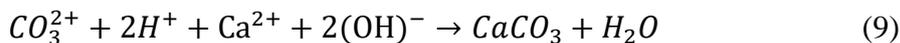
dos poros do solo, ou da carbonatação de hidratados de cimento. Segundo os autores, a taxa de carbonatação depende da facilidade com que o CO₂ se difunde na mistura.

No caso da formação de calcita ser resultado da carbonatação direta da cal hidratada seguem as seguintes reações, demonstradas nas Equações 2, 3 e 4.



Inicialmente, conforme a Equação 2, acontece a dissociação do Ca(OH)₂ (hidróxido de cálcio) na fase aquosa dos poros, ocorrendo a liberação do cátion Ca⁺² e do ânion OH⁻. A Equação 3 apresenta a solubilização do gás carbônico (CO₂) presente no meio reage com os ânions de OH, formando água (H₂O) e íons de carbonato (CO₃⁻²). A formação de CaCO₃ (carbonato de cálcio) é apresentada na Equação 4 e é dada através da reação entre os cátions Ca⁺² e os íons de carbonato (CO₃⁻²).

Quando a formação de calcita se dá através da dissolução de gás carbônico na água presente nos poros da mistura, ocorrem as reações apresentadas nas Equações 5, 6, 7, 8 e 9.

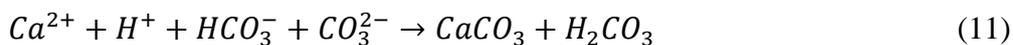
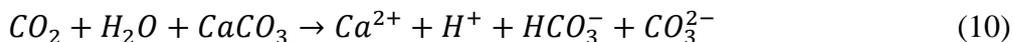


Inicialmente, a cal dissocia-se no meio aquoso (Equação 5). Depois, conforme o demonstrado na Equação 6, o gás carbônico da atmosfera (CO₂) penetra nos poros do solo reagindo com a água presente (H₂O). Como resultado dessa reação, tem-se o ácido carbônico (H₂CO₃) que tem por característica o baixo pH e como consequência disso, colabora para a redução do pH do meio. A Equação 7 apresenta a dissociação espontânea do ácido carbônico e a Equação 8 demonstra a perda de moléculas de hidrogênio. Por fim, conforme a Equação 9, haverá a

reação da formação de calcita (CaCO_3) e H_2O , com a reação do H_2CO_3 e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dissociados.

O produto oriundo dessa reação é indesejável, visto que forma um agente cimentante fraco responsável por impedir os ganhos normais de resistência da mistura (HERRIN; MITCHELL, 1961; MALLELA *et al.*, 2004). A reação pode ser evitada com procedimentos apropriados durante a construção da rodovia, como por exemplo, evitando-se a exposição prolongada da mistura ao ar e/ou precipitação.

Bhuiyan *et al.* (1995) avaliaram o efeito da cimentação da carbonatação devido à adição de pequenas porcentagens de cal hidratada em um solo com ausência de materiais argilosos. Os resultados do estudo apontaram um aumento da resistência das misturas, o que os autores associaram à densificação da matriz devido à reprecipitação de depósitos de calcita presentes na mistura resultantes do processo de carbonatação. Dessa forma, tais precipitados, passaram a preencher os vazios da mistura, proporcionando um melhor contato grão a grão, melhorando e não realizando uma ação cimentante de partícula com partícula como era o esperado. O processo pode ser melhor entendido conforme as Equações 10, 11, 12 e 13:



Os solos com altos teores de calcita (CaCO_3) – 31 e 23% reagem com o gás carbônico e cal do sistema, conforme Equação 10 e 11. O resultado dessa reação é a reprecipitação da calcita e produção de ácido carbônico (Equação 11). O ácido carbônico produzido na Equação 11 em meio aquoso, se dissolve. O ácido carbônico dissolvido (na Equação 12) reage com a cal dissolvida formando calcita e água (Equação 13).

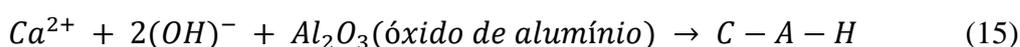
Segundo o exposto por Deneele *et al.* (2013), uma carbonatação muito rápida da Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), leva ao desenvolvimento de uma camada de carbonatos (CO_3^{2-}) em sua superfície bloqueando seu acesso para reações posteriores. No caso em que a carbonatação afeta os hidratados formados durante a reação pozolânica (C-S-H, C-A-H...), os carbonatos não fornecem nenhuma função de resistência, prejudicando o desempenho mecânico.

2.5.4 Reações Pozolânicas

De forma geral, as reações pozolânicas melhoram a resistência e a estabilidade das misturas solo-cal. Isso ocorre devido à interação da cal (rica em cálcio) com a argila (rica em silicatos e aluminatos) (BHUIYAN *et al.*, 1995; LITTLE, 1999). Tal interação já era apontada por Clare e Cluchley (1957), quando indicaram que o alto pH da mistura entre o solo, água e cal, favorece a reação entre a sílica e alumina dos argilominerais do solo com os íons de cálcio presentes na cal.

Sabendo que a adição da cal ao solo aumenta o pH até um valor favorável à dissolução da sílica e alumina presentes na argila, o meio torna-se propício para a formação de produtos cimentantes (EADES; NICHOLS JR; GRIM, 1962). Com o tempo de cura e aumento de resistência, há uma redução no valor do pH do meio devido ao consumo da cal durante as reações pozolânicas (EADES; GRIM, 1966). Dessa forma, as reações entram em equilíbrio pois há um gradual consumo dos íons OH liberados pela portlandita durante as reações pozolânicas (DENELEE *et al.*, 2016; DHAR; HUSSAIN, 2019).

Devido à interação dos argilominerais com a cal resultarem em mudanças estruturais, constata-se que essas mudanças são relativamente permanentes (EADES; GRIM, 1960). Essas reações podem ser simplificadas conforme o apresentado pelas Equações 14 e 15:



Harty e Thompson (1973) evidenciaram que com pequena quantidade de sílica e alumina é possível sustentar a reação pozolânica da cal com o solo. Todavia, solos com maiores porções de argila irão precisar de maiores porcentagens de cal para alterar suas características físico-químicas (estabilização) e os solos com baixo teor de argila requerem menos cal para alterar suas características de plasticidade (melhoramento) (DHAR; HUSSAIN, 2019).

É importante ressaltar que minerais argilosos e amorfos (quartzo, feldspatos, micas e outros minerais semelhantes aos silicatos ou alumino silicatos, de natureza cristalina ou amorfa) são as únicas possíveis fontes de sílica e de alumina em solos finos (MALLELA *et al.*, 2004). Alguns estudos indicam que a presença de matéria orgânica no solo não é capaz de bloquear as reações pozolânicas oriundas da interação entre o solo e a cal, somente de retardar o início das mesmas (ARMAN; MUNFAKH, 1972; BUENO, 2011).

Eades e Grim (1960) já indicavam que o aumento da resistência era proporcionado pela interação de minerais como a caulinita, illita e montmorilonita com a cal. No caso da caulinita, essa interação começa pelas bordas do argilomineral formando uma nova fase em torno do núcleo.

Segundo os autores supracitados, a caulinita reage mais dificilmente com a cal quando comparada com argilominerais como as illitas e montmorilonitas. No primeiro caso, maiores quantidades de cal precisam ser adicionadas para que ocorram reações acompanhadas do aumento de resistência. Nas reações da cal com argilominerais de três camadas (illita e montmorilonita) há uma substituição dos cátions existentes entre folhas de silicato por Ca^{++} (íons de cálcio da cal).

Mallela *et al.* (2004) observaram a reação/consumo do quartzo pela cal. Tal interação também foi apontada por outros pesquisadores (DASH; HUSSAIN, 2012; RAO; ASHA, 2012; YILDIRIM *et al.*, 2015).

Um estudo realizado por Vitale *et al.* (2017) avaliou a influência da mineralogia de duas diferentes argilas (caulinita e bentonita) quanto à reatividade com a cal virgem (CaO). Notou-se que a caulinita apresenta menor reatividade com a cal, o que leva a um atraso na precipitação de novas fases hidratadas. No caso da bentonita, a adição de cal levou a um aumento na RCS e redução volumétrica de curto prazo. Dessa forma, constatou-se que a atividade pozolânica das argilas tratadas com cal depende fortemente da mineralogia das argilas presentes no solo.

Akula e Little (2020) indicam a utilização dos ensaios de resistência à compressão simples, pH e Índice de Plasticidade para validar a reação pozolânica nos solos tratados com cal. A mineralogia do solo e a formação de compostos cimentícios como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H e C-S-H) pode ser analisada por meio do ensaio de difração de raios (DRX) e análise térmica diferencial (DTA). Segundo os autores, o conjunto desses cinco ensaios laboratoriais forma um protocolo eficaz de avaliação da qualidade e durabilidade de solos tratados com cal.

2.6 MÉTODOS DE DOSAGEM

Ao longo dos anos, diferentes pesquisas abordando a dosagem de mistura solo-cal foram realizadas, inclusive transformaram-se em normas internacionais. Na sequência são apresentadas algumas dessas metodologias.

2.6.1 Método Lime Fixation Point

Conforme a metodologia proposta por Hilt e Davidson (1961), o ensaio de limite de plasticidade (LP) é realizado aumentando-se o teor de cal até que o limite de plasticidade (LP) alcance um valor máximo, denominado *Lime Fixation Point* (LFP). Assim, para teores de cal maiores que aquele estipulado para o LFP, o solo ganha resistência, sem ter sua trabalhabilidade e limite de plasticidade modificados. O ensaio de determinação do limite de plasticidade (LP) é normatizado pela NBR 7180 (ABNT, 2016a).

2.6.2 Método do pH

Prusinski e Bhattacharja (1998) indicam a importância da manutenção do ambiente de alto pH para camadas estabilizadas com cal devido às reações de longo prazo, diferentemente das reações de formação dos compostos cimentícios que ocorrem durante a hidratação do cimento. Reações pozolânicas podem continuar por longos períodos, contudo, ressalta-se a necessidade de suficiente quantidade de cal e da manutenção do alto pH do meio (acima de 10) (LITTLE, 1999). Pequenas concentrações de cal são capazes de aumentar o pH da água neutra de 7 para 11 (PRUSINSKI; BHATTACHARJA, 1998).

A presença de matéria orgânica no solo propicia um meio ácido à estabilização, todavia, por meio de alterações no pH ocorridas pelo aumento do teor incorporado de cal, Bueno (2011) verificou ser possível neutralizar essa acidez, permitindo o início das reações solo-cal.

A metodologia proposta por Eades e Grim (1966) resultou em um ensaio, normatizado pela ASTM D 6276 (ASTM, 2019), que usa o valor do pH para estimar a proporção solo-cal necessária para estabilizar determinado solo. No ensaio, são separadas cinco amostras com 25 gramas de solo cada, variando-se para essas o teor de cal adicionado (2, 3, 4, 5 e 6%). Mais uma amostra de 2,0 gramas de cal é separada para que seja representada uma solução de cal saturada. Posteriormente, uma quantidade de 100 mL de água deve ser adicionada a cada uma

das misturas. As misturas devem então ser tapadas e agitadas durante 30 segundos. Essa agitação deve ser realizada a cada dez minutos, durante uma hora.

Por fim, são realizadas leituras do pH de cada mistura, determinando-se o teor mínimo da mistura solo-cal para que um pH mínimo de 12,4 seja atingido. O valor de 12,4 representa a cal livre remanescente na mistura. Recentemente, o DNIT também normatizou o ensaio por meio da normativa 419 (DNIT, 2019), baseando-se na D 6276 (ASTM, 2019).

2.6.3 Método de Thompson

Segundo o critério de Thompson (1966a), os solos reativos à cal seriam aqueles que têm um ganho de resistência superiores 345 kPa após 28 dias de cura à temperatura de 22,8 °C. Os solos com baixa reatividade à cal, são aqueles que, mesmo em condições de cura controlada, demonstrassem ganho de resistência inferior a 345 kPa. A metodologia ainda indica a adoção de quatro teores de cal para verificação do teor ótimo. A vantagem da metodologia de Thompson é o fato dessa apresentar uma verificação do comportamento mecânico da mistura. É importante ressaltar que na época da criação do critério a energia de compactação considerada era a normal.

2.6.4 Método das Pastilhas – Metodologia MCT

A metodologia expedita de classificação de solos com o uso de pastilhas MCT (Miniatura Compactada Tropical) foi estudada por Nogami e Villibor (1994). Os autores propuseram a classificação de solos dentro da metodologia MCT por meio de valores obtidos para a contração diametral e penetração de amostras moldadas no formato de “pastilhas” dentro de anéis com 20 mm de diâmetro e 5 mm de altura.

O método das pastilhas foi proposto por Corrêa (2008) visando o emprego em misturas solo-cal com o intuito de minimizar a expansão de um solo expansivo oriundo da Rodovia SC-422. A autora realizou a moldagem com amostras de solo natural e solo melhorado com cal observando fenômenos como inchamento, trincamento e amolecimento. De acordo com os valores de penetração e contração diametraes obtidos para os solos naturais em estudo e solos melhorados, foi verificada a mudança de classificação para os solos modificados dentro das classes da metodologia MCT, sendo consideradas aptas àquelas misturas classificadas como lateríticas.

2.7 FATORES QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO DAS MISTURAS SOLO-CAL

A modificação e estabilização de solos com cal envolvem diversas mudanças a curto e/ou longo prazo nas misturas. As seguintes seções fazem uma breve abordagem quanto a essas mudanças.

2.7.1 Características do Solo

O tipo do processo de intemperismo predominante em determinado perfil de solo influencia significativamente o estado dos constituintes básicos desse solo. Dessa forma, a reatividade potencial da cal em relação ao solo também se altera de acordo com o processo de intemperismo (HARTY; THOMPSON, 1973). Para que seja estabelecido um protocolo de projeto de misturas solo-cal é imprescindível que o solo seja mineralogicamente reativo à cal (LITTLE, 1999).

O emprego de cal limita-se essencialmente à estabilização de solos de alta e média plasticidade. Para solos com baixa ou nenhuma plasticidade, cinzas ou outros materiais pozolânicos podem ser incorporados com o intuito de auxiliar na ação de cimentação (HERRIN; MITCHELL, 1961). Solos que possivelmente apresentariam boa resposta ao tratamento com cal teriam índice de plasticidade (IP) maior que 10 (LITTLE *et al.*, 1987; MALLELA *et al.*, 2004). Quanto ao teor de argila, os autores defendem uma porcentagem mínima de 7% (LITTLE *et al.*, 1987; MALLELA *et al.*, 2004).

A forma angular e cúbica das partículas do solo, conforme evidenciado por Bhattacharja *et al.* (2003), também é importante para proporcionar melhor empacotamento e maior atrito entre partículas.

Little e Yusuf (2001) destacam que altas concentrações de íons de sulfato podem causar reações deletérias entre a cal, argilominerais do solo e água. Desse modo, reafirma-se a importância de estudar a composição química do solo tendo em vista a capacidade de troca catiônica e teor de enxofre presente no mesmo. Bueno (2011) verificou menores resistências para a mesma cal e teores adicionados para um solo de mesma classificação pedológica, em dois períodos de tempo distintos. Entretanto, foi verificada uma diferença de quase 50% no teor de enxofre, o que poderia justificar uma possível fonte de sulfatos (contaminação) com potencial expansivo.

2.7.2 Tipo e Teor de Cal

De acordo com Guimarães (1997), a cal calcítica possui um teor de CaO (óxido de cálcio) entre 90 a 100%, já a cal dolomítica possui aproximadamente 60%. Segundo o autor, a cal dolomítica também é caracterizada por conter altos teores de MgO (óxido de magnésio), sendo esses teores de aproximadamente 40%. No Rio Grande do Sul, é produzida somente a cal dolomítica, portanto, a utilização dessa cal no estado, mesmo em teores mais elevados, pode ser economicamente mais viável que a calcítica, devido às distâncias de transporte (LOVATO, 2004).

Dados referentes a ensaios do comportamento mecânico de um latossolo vermelho da região de Cruz Alta (RS) estabilizado com cal calcítica e dolomítica atestaram maior eficiência da cal calcítica (LOVATO, 2004). Essa constatação também foi verificada por Bueno (2011) para misturas com solo laterítico em que amostras com cal calcítica apresentaram resistências de 421 kPa aos sete dias, já as com cal dolomítica apresentaram resistências de 328 kPa para o mesmo tempo de cura.

Ormsby e Kinter (1973a) indicaram que solos ricos em caulinita resultam em maiores resistências quando adicionada a cal calcítica, quando comparada à dolomítica. Entretanto, Remus e Davidson (1961) obtiveram resultados de resistência idênticos para ambas as cales, para solos com o mesmo argilomineral (caulinita). Os autores também observaram que a cal dolomítica tem melhor interação com solos com presença de illita e montmorilonita, resultando em maiores resistências (quando comparada com a cal calcítica).

Destaca-se que teores muito baixos de cal, na prática, não seriam aceitáveis, levando em consideração a homogeneidade na distribuição da cal em campo (BEHAK, 2011). Núñez (1991) também salienta a necessidade da “correção” dos teores de cal e energia de compactação caso o solo e estabilizante forem misturados em campo, uma vez que o tempo decorrido entre a mistura dos materiais e a compactação raramente é inferior a uma hora. Essa correção deve ocorrer em função dos valores de resistência à compressão simples e do grau de compactação especificados em projeto. Segundo o autor, em casos de demora entre a mistura e a compactação, pode ser necessário o aumento da energia de compactação para que seja alcançada a resistência especificada.

2.7.3 Energia de Compactação

Para determinado teor de cal, o aumento da densidade produzido pelo aumento no esforço de compactação resulta em maior resistência às intempéries (HERRIN; MITCHELL, 1961). Remus e Davidson (1961) salientam que o aumento na energia de compactação (energia normal para modificada) influencia muito na resistência, aumentando-a em taxas que variam de 50 a 250%. Esse ganho na resistência também foi observado por Núñez (1991) em relação à energia normal para intermediária (essa última empregada somente no Brasil), e por Osinubi (1998) em relação à energia normal e a “*West African Standard*” (correspondente a uma energia entre a normal e a modificada).

Tal aumento dos valores de resistência relacionado à energia de compactação utilizada é causado pela maior densidade atingida pela mistura, com maior contato grão a grão, tornando mais fácil a cimentação (NÚÑEZ, 1991). Bhattacharja *et al.* (2003) indicam que essa aproximação entre os grãos pode tornar o sistema mais estável a qualquer mudança de volume, minimizando problemas de expansão. Logo, a densidade do material compactado influenciará na resistência desse após a cura (THOMPSON, 1967).

Em relação ao nível de proximidade com o campo, Little e Yusuf (2001) recomendam a energia de compactação modificada para a moldagem de corpos de prova em laboratório. Isso diz respeito a esse nível de compactação ser possível com equipamentos de campo convencionais.

2.7.4 Teor de Umidade

Pesquisas precursoras com misturas solo-cal já indicavam que a adição de cal no solo resultaria em um leve aumento no teor de água (JOHNSON, 1949). Além disso, indicava-se que máxima resistência poderia ser desenvolvida com o controle adequado do teor de umidade e da densidade (JAN; WALKER, 1963).

O teor de umidade junto com a densidade seca máxima variam conforme a quantidade de cal e o teor de argila encontrado na mistura solo-cal (ARMAN; MUNFAKH, 1972). De forma geral, vários estudos indicaram que a adição de cal ao solo causa um aumento na umidade

ótima desse (JAN; WALKER, 1963; OLA, 1977; LOVATO, 2004; BUENO, 2011; MACHADO *et al.*, 2006).

Ressalta-se que o alcance do teor ótimo de umidade de compactação de um solo argiloso desempenha um papel fundamental na compactação, durabilidade e resistência do solo compactado, em decorrência do efeito na estrutura e orientação das partículas na mistura (RAHMAT; ISMAIL, 2018). Sweeney *et al.* (1988) indicaram que um solo argiloso tratado com cal compactado no ramo seco apresentou estrutura floculada, enquanto que a mesma mistura compactada no ramo úmido apresentou estrutura mais orientada e dispersa. Dessa forma, os autores constataram que a expansão sofre redução com o aumento no teor de água.

2.7.5 Condições de Cura

As misturas solo-cal devem ser curadas durante um determinado período de tempo para obter resistência e durabilidade adequadas. Esse tempo de cura é relativamente rápido em altas temperaturas e lento em temperaturas mais baixas, podendo praticamente cessar e/ou produzir pouca resistência até que a temperatura aumente novamente (HERRIN e MITCHELL, 1961). Mallela *et al.* (2004) indicam que temperaturas inferiores a 16 °C retardam as reações.

Com o intuito de obter resultados mais rápidos quanto à resistência mecânica de misturas solo-cal é possível empregar processos de cura acelerada. Essa cura é feita com temperaturas mais altas e em menor período de tempo. A *National Lime Association* (2006) dos Estados Unidos recomenda que essa cura seja feita durante 7 dias sob temperatura de 40 °C.

A norma americana D5102 (ASTM, 2009) indica uma sala (ressalta-se aqui a não obrigatoriedade de câmara úmida) capaz de manter a temperatura entre 23 ± 2 °C para cura não acelerada de amostras solo-cal. Podem ser utilizados quaisquer períodos de cura para estudo, no entanto, a norma indica os períodos de 7, 28 e 90 dias. Para evitar a perda de umidade e a carbonatação, muitos autores relatam a cura de corpos de prova em sacos plásticos fechados (DEMPSEY; THOMPSON, 1968; ARMAN; MUNFAKH, 1972; GEORGE; PONNIAH; LITTLE, 1992; SIVAPULLAIAH; PRASHANTH; SRIDHARAN, 1998; YILDIRIM; SAHMARAN; AHMED, 2015).

2.8 PROPRIEDADES ALTERADAS PELA ADIÇÃO DE CAL AO SOLO

Conforme verificado anteriormente, a cal influencia na estrutura química/física do solo. Dessa forma, os próximos tópicos abordam as propriedades modificadas devido a incorporação desse aditivo no solo.

2.8.1 Parâmetros de Compactação

Como já mencionado no item 2.7.4., a incorporação da cal ao solo proporciona um aumento no teor de umidade ótimo. Muitos estudos também relataram redução do peso específico aparente seco máximo do solo com a adição da cal (LOVATO, 2004; BUENO, 2011). Essa diminuição está ligada ao melhor entrosamento entre as partículas do solo devido às reações rápidas (floculação e aglomeração). De acordo com Sivapullaiah *et al.* (1998), a estrutura floculada da mistura é forte o bastante para resistir aos esforços de compactação com um maior índice de vazios.

Para materiais compactados imediatamente após a mistura entre o solo, água e cal, as mudanças nas características de compactação devem-se principalmente à alteração da granulometria do solo. Destaca-se que quando a compactação é retardada, os produtos de hidratação começam a ligar fracamente as partículas e, a interrupção dessas agregações é necessária para adensar o solo, que pode não recuperar sua resistência total (OSINUBI, 1998).

2.8.2 Plasticidade

Conforme Prusinski e Bhattacharja (1998), a plasticidade de um solo é determinada pelo teor de argila expansiva presente no solo, especialmente a montmorilonita. Dessa forma, um bom aditivo estabilizador, de acordo com Bhattacharja e Bhatta (2003), deve agir com as partículas de argila, resultando em um solo mais maleável, com plasticidade reduzida. A redução do índice de plasticidade e, a textura siltosa e friável, após a adição de cal ao solo indicam mudanças benéficas na trabalhabilidade (THOMPSON, 1967).

A redução no índice de plasticidade com a incorporação da cal foi observada por diversos pesquisadores (AKULA; LITTLE, 2020; ATHANASOPOULOU, 2014; POMATTI, 2000;

ARMAN, A.; MUNFAKH, 1972; THOMPSON, 1967; EADES; GRIM, 1966). Com o aumento no período de cura das misturas solo-cal, o índice de plasticidade mostra uma tendência crescente, fato atribuído à formação excessiva de sílica gel, responsável por aumentar a capacidade geral de retenção de água no solo (DASH; HUSSAIN, 2012). No caso de solos com maior teor de matéria orgânica, é possível obter redução no índice de plasticidade, conforme apresentado por Arman e Munfakh (1972), com cerca de 4% de adição de cal, já para solos com maior teor de matéria orgânica é necessária maior quantidade de cal.

2.8.3 Volumetria

Sub-bases construídas com solos argilosos podem causar degradação prematura no pavimento devido a alterações de volume induzidas pela umidade e baixa capacidade de suporte. A cal é conhecida pela capacidade de estabilizar argilas plásticas, podendo melhorar as propriedades da sub-base no que diz respeito à estabilidade volumétrica (PRUSINSKI; BHATTACHARJA, 1998). Esse aditivo tende a produzir mudanças volumétricas nos solos, e teores adicionais de cal tendem a produzir mudanças graduais até que seja atingido um nível ótimo. Porém, pouca alteração volumétrica é observada pela adição em quantidades maiores que esse teor ótimo (HERRIN; MITCHELL, 1961). Dessa forma, a incorporação de cal ao solo diminui o potencial de expansão considerando que as variações de umidade no material estabilizado não são grandes, atenuando o potencial de trincamento devido à retração (LITTLE *et al.*, 1987).

Sobre alterações volumétricas, Khattab *et al.* (2007) verificaram que, para um determinado solo plástico, o tratamento com cal levou a uma redução na expansão de 75% na amostra não tratada para 49% na amostra tratada com cal após 7 ciclos de umedecimento e secagem. Os autores concluíram que o tratamento com cal causou modificações na granulometria, aumentando o volume ocupado pelos grãos, melhorando o entrosamento dos grãos e microestrutura da mistura. A variação do volume das amostras tratadas também foi comentada por Mallela *et al.* (2004).

2.8.4 Resistência

Com a aplicação de cargas no pavimento, são desenvolvidas deformações horizontais de extensão relativamente pequenas na fibra inferior da camada cimentada. Lovato (2004) ressalta que mesmo sendo de pequena magnitude, tais deformações são capazes de gerar microfissuras. A aparição dessas microfissuras, conforme apresentado pelo autor, ocorre a

níveis de deformação de aproximadamente 25% da deformação de ruptura. Sendo importante ressaltar que, embora existam microfissuras, as camadas cimentadas visualmente parecerão íntegras e possuirão elevados valores de resistência à compressão.

O aumento na resistência à compressão simples está relacionado com o tempo, e continua conforme a disponibilidade de íons de cálcio, sílica e alumina (presentes nos argilominerais do solo) que reagem na presença de água (BEHAK, 2013). Segundo Akula e Little (2020) a adição de cal hidratada aumenta a resistência à compressão simples média em solos reativos, podendo ser utilizada como um parâmetro de validação para utilização da cal para fins de estabilização.

Em um estudo realizado com 11 solos estabilizados com cal, Thompson (1966b) constatou que as misturas do tipo solo-cal desenvolveram considerável resistência à tração diretamente relacionadas com a resistência à compressão simples. O autor indica que fatores como o tipo de cal empregada, período de cura e tipo de solo influenciam em ambas as resistências, porém, não afetam a relação entre elas, fato também observado por Baldovino *et al.* (2018).

Essa relação entre as resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral também foi aferida por outros pesquisadores (LOVATO, 2004; THOMPSON, 1966a). Lovato (2004) ainda analisou a influência de dois tipos de cales (cálcica e dolomítica) nessa relação. O autor constatou que as misturas com cal cálcica apresentaram um comportamento mais definido quanto à relação RCD/RCS referente às com cal dolomítica (com grande dispersão de dados).

A resistência de misturas solo-cal tende a aumentar com o tempo. Contudo, Lovato (2004) constatou pequenas quedas na resistência de três teores de misturas solo-cal estudadas comparando tempos de cura de 56 para 112 dias. Devido a isso, o autor levantou duas hipóteses: I) conjuntos de moldagens das amostras (sem aleatoriedade) e II) possível formação de etringita e taumasita (compostos expansivos) decorrentes da presença de sulfatos no solo, aliadas à carbonatação. Dessa forma, as reações pozolânicas poderiam ter sido prejudicadas considerando a combinação do ataque de sulfatos e carbonatação.

2.8.5 Durabilidade

Dempsey e Thompson (1968) definiram durabilidade como sendo a capacidade das misturas solo-cal de manterem a sua integridade às ações das intempéries ao longo dos anos. Para os

autores, os mecanismos de deterioração dependem das propriedades do solo estabilizado, do tipo e intensidade das condições da exposição do material. Quanto à resistência das misturas solo-cal ao intemperismo, ressalta-se a influência do teor e tipo de cal empregada, tempo de cura e energia de compactação (HERRIN; MITCHELL, 1961; NÚÑEZ, 1991).

Um estudo de durabilidade para misturas do tipo solo-cal, foi realizado utilizando quatro solos representativos de Illinois, Estados Unidos. A pesquisa realizada por Dempsey e Thompson (1968) consistiu na moldagem de amostras em laboratório submetidas a 12 ciclos controlados de congelamento (-7 a -4 °C, durante 16 horas) e descongelamento (24 a 26 °C, durante 8 horas), e dois períodos de cura acelerada (48 e 96 horas a 49 °C). Os autores notaram que todas as misturas exibiram queda na resistência após os ciclos, independentemente do tipo de solo empregado e dos períodos de cura utilizados.

Para o estudo de durabilidade utilizando ciclos de congelamento e descongelamento, notou-se que amostras de solo-cal curadas por períodos de tempo maiores (48 e 96 horas, cura acelerada) obtiveram resistências iniciais maiores, porém, apresentaram taxas mais elevadas na diminuição da resistência. As misturas dos solos que apresentaram alta resistência à compressão simples durante a cura acelerada, também demonstraram alta resistência residual após a passagem pelos ciclos (DEMPSEY; THOMPSON, 1968).

Tendo em vista que em climas tropicais as estruturas dos pavimentos estão expostas a outras condições climáticas, no Brasil, a avaliação da durabilidade por meio de ensaios cíclicos de congelamento e descongelamento, foi adaptada por Núñez (1991). Assim, optou-se por submeter as amostras a ciclos de molhagem e secagem. O autor utilizou como critério de durabilidade, o mesmo quociente entre as resistências à compressão simples de amostras submetidas e não submetidas a ciclos de molhagem e secagem utilizado por Marcon (1977) para outras misturas estabilizadas, onde a relação entre as médias das amostras deveria ser superior a 0,80.

Vários estudos também realizaram modificações da normativa D559 da ASTM (2015a): "*Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures*", visando o emprego em misturas do tipo solo-cal ao invés de misturas solo-cimento. A norma visa o condicionamento de amostras em ciclos de umedecimento e secagem do material com o intuito de avaliar a durabilidade de misturas de solo-cimento. No caso de Bhattacharja e Batty (2003), por exemplo, a escovação dos corpos de prova não foi realizada, já Chakraborty e

Nair (2017) utilizaram temperaturas mais baixas que o previsto na normativa para os ciclos de secagem das amostras.

É importante considerar que de forma geral, estudos considerando ciclos de molhagem e secagem verificaram diminuição nos valores de resistência à compressão simples para amostras ensaiadas após os ciclos. Também constatou-se um aumento da resistência de acordo com o aumento do teor de cal incorporado nas misturas (BEHAK, 2013; MACHADO *et al.*, 2006; DE PAIVA, 2016; NABIL *et al.*, 2019).

Sendo o solo um material poroso, ele tem a capacidade de absorver água por capilaridade, mantê-la e retê-la. Nabil *et al.* (2019) explicam que após um ciclo de secagem, os solos já podem apresentar trincas devido à retração e à baixa resistência à tração. Em decorrência da exposição repetitiva aos ciclos de secagem, as forças de sucção aumentam até que a tensão de tração se iguale às forças coesivas. Dessa forma, com a perda de água adicional das amostras, as trincas iniciais aumentam, permitindo a formação de novas trincas. Por consequência, o tratamento de solos com cal pode melhorar a resistência destes quanto à exposição aos ciclos de molhagem e secagem, considerando a formação de produtos cimentantes que contribuem para a redução da porosidade e absorção de água.

Na ação cíclica de umedecimento e secagem, as paredes dos poros do solo sofrem uma pressão capilar, podendo entrar em colapso após repetidos ciclos. Consequentemente, a durabilidade do material depende da estrutura dos poros e de sua resistência elástica (Bhattacharja; Bhatta, 2003). Em relação a isso, Chakraborty e Nair (2017) observaram que o condicionamento das amostras por meio de imersão por capilaridade causou uma diminuição nos valores de RCS, também relacionada à combinação dos efeitos de aumento da pressão da água dos poros (e subsequente redução da tensão efetiva) e da água retida pelas fases de C-S-H precipitadas.

No caso de misturas tratadas com cal persistirem em contato prolongado com a água, essa parece anular gradualmente os efeitos da adição da cal. Os solos passam a apresentar comportamento de lixiviação, havendo descalcificação dos compostos C-S-H e por consequência diminuição da resistência do solo (DENELE *et al.*, 2016). Nesse sentido, a adição de teores de cal acima do teor ótimo podem ser um meio de aumentar a durabilidade de estruturas hidráulicas de terra a longo prazo.

2.8.6 Fadiga

Considerando a vida de fadiga como um importante parâmetro estrutural para o dimensionamento de pavimentos, ela foi estudada por Behak (2013) que estabelece essa como sendo a capacidade de resposta sem o surgimento de trincas significativas perante a ação de cargas cíclicas, diante de determinadas condições ambientais.

O conceito de aumento contínuo da resistência com o tempo é importante na avaliação das misturas solo-cal, dessa forma, o ganho de resistência ajuda a compensar o efeito das cargas repetidas (fadiga) (THOMPSON, 1967). Devido às características de auto cicatrização, as misturas de cal e cinza volante, por exemplo, são menos suscetíveis à ruptura por fadiga do que a maioria dos outros materiais de pavimentação, a menos que a ruptura por fadiga ocorra durante os primeiros dias de carregamento. Isso ocorre devido ao processo de cicatrização, que fornece um efeito de cura maior do que o dano causado pelas cargas repetidas (LITTLE *et al.*, 1987).

A fadiga dos materiais cimentados ocorre como resultado das cargas de tráfego repetidas, sendo categorizada como fadiga de baixo para cima (*bottom-up*), causada por solicitações de tração, ou fadiga de cima para baixo (*top-down*), ocasionada por solicitações de compressão (WEN *et al.*, 2014). A vida de fadiga está diretamente ligada à relação entre a tensão/deformação aplicada a resistência do material (tensão/deformação admissível).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

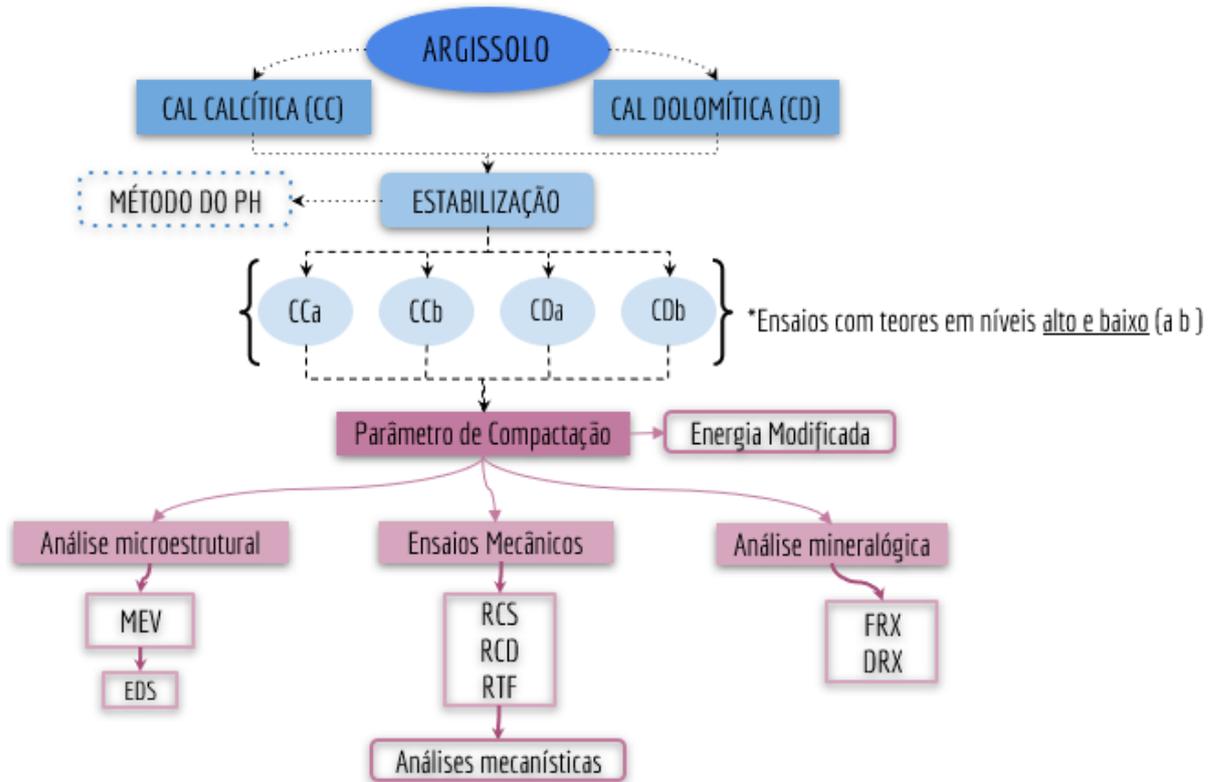
Para avaliar a influência do teor de cal no comportamento das diferentes misturas solo-cal, optou-se pelo uso de dois teores (“a” e “b”) de duas diferentes cales, sendo que a escolha foi realizada a partir da normativa 419 do DNIT (DNIT, 2019a). Dessa forma, foram estudadas quatro misturas para o solo em análise, possibilitando avaliar o efeito do teor e do tipo de cal no comportamento mecânico do solo estabilizado com cal. Na Tabela 4, é possível identificar as misturas que foram analisadas neste estudo, assim como a nomenclatura adotada. Após a escolha da estrutura, prosseguiram-se quatro etapas: coleta de material, ensaios e análise dos dados.

Tabela 4: Descrição e nomenclatura das misturas solo-cal estudadas

Teor de Cal	Tipo de Cal	Nomenclatura
Nível baixo (b)	Calcítica (CC)	AM-CCb
Nível alto (a)	Dolomítica (CD)	AM-CDa
Nível baixo (b)	Dolomítica (CD)	AM-CDb
Nível alto (a)	Calcítica (CC)	AM-CCa

Para melhor visualização e compreensão do programa experimental que foi desenvolvido nesse trabalho, são apresentadas, na Figura 2, as etapas necessárias para o alcance dos resultados almejados.

Figura 2: Fluxograma dos procedimentos metodológicos da pesquisa



A Tabela 5 apresenta um esquema referente ao número de amostras moldado para cada ensaio. Para o ensaio de resistência à compressão simples (RCS) foram moldadas três amostras por mistura (mais o solo *in natura*), para cada tempo de cura previsto (7, 28, 90, 120 e 180 dias). O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RCD) também foi realizado em triplicata para cada mistura, para cada tempo de cura previsto (28, 90 e 120 dias). Para o ensaio de resistência à tração na flexão foram feitas triplicatas aos 28 dias.

Tabela 5: Número de amostras por mistura

	RCS	RCD	RTF
CCa	15	9	6
CCb	15	9	-
CDa	15	9	6
CDb	15	9	-
TOTAL:	60	36	12

No caso dos ensaios de difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram utilizados os mesmos corpos de prova utilizados para a determinação da RCS. Somente foram realizadas as análises de mineralogia para o solo estabilizado com os maiores teores de cal (CCa, CDa), nas idades de 7, 28, 90, 120 e 180 dias, além do solo *in natura*.

Optou-se por utilizar os maiores teores e tempos de cura levando em consideração a melhor visualização do consumo dos argilominerais presentes no solo e formação de produtos cimentantes. Nas análises MEV foram analisadas amostras nos maiores teores, curadas durante 7, 90, 120 e 180 dias, além do solo *in natura*.

3.1 MATERIAIS

Essa seção apresenta os materiais utilizados no estudo, ou seja, o solo (argissolo) e as cales (calcítica e dolomítica).

3.1.1 Solo

O principal fator influenciador na escolha do solo estudado nessa pesquisa foi a pedologia. Entende-se como importante a abrangência dos 13 grupos pedológicos de solos brasileiros, possibilitando, por meio desse estudo, uma análise de possíveis correlações entre os parâmetros do solo e o seu comportamento quanto à adição de cal. Dessa forma, o presente estudo teve como intuito abranger um desses grupos pedológicos, o do argissolos.

O argissolo utilizado nessa pesquisa foi coletado de uma jazida comercial localizada na cidade de Gravataí (Rio Grande do Sul), nas proximidades da RS-118 (localização: 29°53'00.5"S 51°01'04.4" W). A Figura 3 apresenta a localização da jazida comercial.

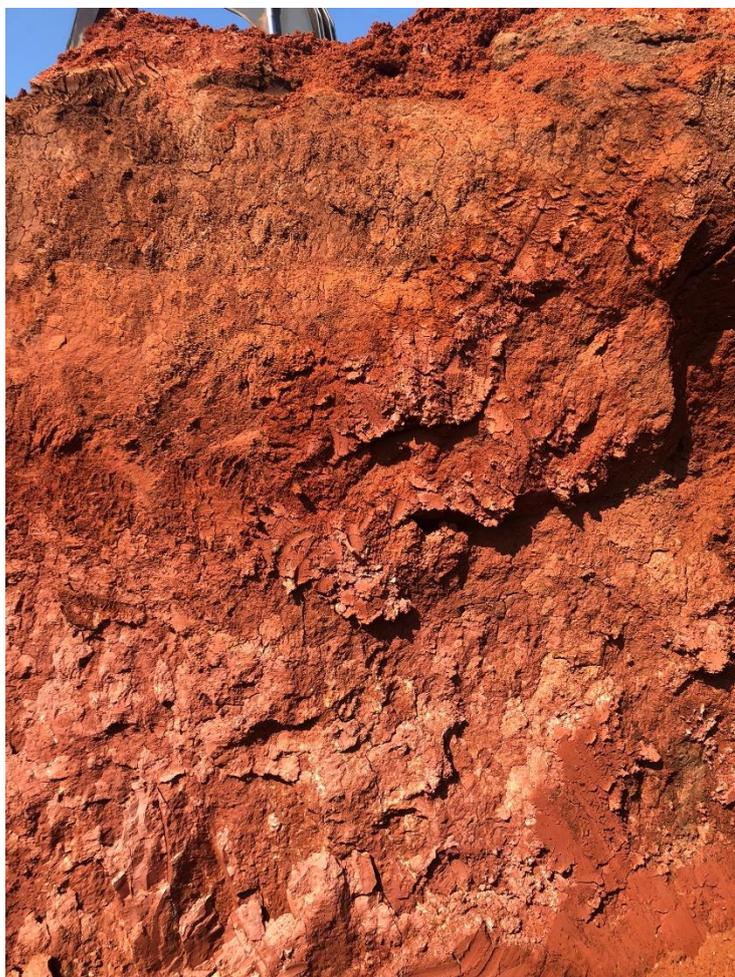
Figura 3: Localização da Jazida do Argissolo



Fonte: Adaptado Google Maps (2020)

O solo apresenta coloração avermelhada, com horizonte B textural argiloso. A Figura 4 apresenta um corte localizado na jazida em que o solo foi retirado.

Figura 4: Argissolo utilizado na pesquisa



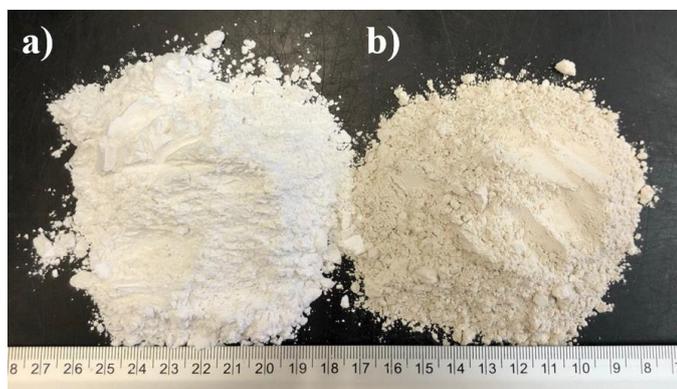
As amostras do argissolo foram coletadas do horizonte B da jazida, no estado deformado, por meio de escavação com ferramenta mecânica (retroescavadeira), em quantidade suficiente para os ensaios previstos. O transporte e armazenamento do material ocorreu por meio de bombonas plásticas, visando o isolamento da umidade e qualquer outra fonte contaminação.

3.1.2 Cales

Conforme comentado anteriormente, foram utilizados dois tipos de cal hidratada: a calcítica e a dolomítica. A cal calcítica é oriunda do estado de Minas Gerais e foi caracterizada como hidratada de alto cálcio pelo fabricante, podendo ser visualizada na Figura 5, a. Já a cal dolomítica é oriunda do estado do Rio Grande do Sul e caracterizada como cal hidratada

especial CH-II, podendo ser visualizada na Figura 5, b. O material apresenta altos teores de cálcio e magnésio, conforme descrito pelo fabricante.

Figura 5: Cales utilizadas, a) calcítica e b) dolomítica



Para a especificação do material para fins de pavimentação, abrangendo o uso para estabilização de solos, as cales devem atender às características físico-químicas dispostas na normativa DNIT 418 (DNIT, 2019). A Tabela 6 mostra o conjunto de referências normativas para os ensaios indicados e os limites para aceitação ou rejeição das cales, conforme a normativa indicada.

Tabela 6: Exigências físico-químicas da DNIT-ME 418

Parâmetros Físico-Químicos	Unidade	Cal Hidratada	Ref. Normativa de Ensaio
Química			
Óxido total (CaO + MgO)t Base não volátil	%	≥ 90,0	NBR 6473
Óxido de Cálcio disponível (CaO disp.)	%	≥ 65,0	NBR 6473
Hidróxido de Cálcio Ca(OH) ₂	%	≥ 85,0	NBR 6473
Óxido de Magnésio (MgO)	%	≤ 5,0	NBR 6473
CO ₂	%	≤ 4,0	NBR 6473
SO ₃	%	≤ 2,0	NBR 6473
Umidade	%	≤ 2,0	NBR 6473
Física			
Material Passante na peneira 0,21 mm	%	≥ 98,0	NBR 9289
Material passante na peneira 0,075 mm	%	≥ 93,0	NBR 9289

Fonte: IPR (2019)

Os ensaios de caracterização das cales foram realizados por Kleinert (2021) em estudo prévio. O resultado da caracterização é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Caracterização das cales

Parâmetro	Cal calcítica	Cal dolomítica
CaO _T (%)	73,08	45,22
MgO (%)	0,55	31,1
Ca(OH) ₂ (%)	92,63	44,42
Mg(OH) ₂ (%)	0,8	39,63
(CaO + MgO) _T (%)	98,15	93,06
Al ₂ O ₃ (%)	0,05	0,41
SiO ₂ (%)	0,12	3,02
Fe ₂ O ₃ (%)	0,18	1,29
CO ₂ (%)	2,42	2,88
S (%)	0,032	0,011
Na ₂ O (%)	-	0,107
K ₂ O (%)	-	0,375
P ₂ O ₅ (%)	0,059	0,025
SrO (%)	0,391	0,029
ZrO ₂ (%)	0,045	0,005
MnO (%)	-	0,088
ZnO (%)	-	0,007
TiO ₂ (%)	-	0,048
BaO (%)	-	0,031
Cl (%)	0,015	0,014
Perda ao fogo (%)	25,22	17,99
Umidade (%)	0,7	0,4
Massa unitária (g/cm ³)	0,3981	0,6056
Retido na peneira #28 (0,600 mm)	0	0
Retido na peneira #200 (0,075 mm)	0,21	17,79

Fonte: Kleinert (2021)

A NBR 418 (DNIT, 2019b) apresenta exigências de características físicas e químicas para emprego na pavimentação, somente da cal calcítica. De acordo as características químicas, apresentadas na Tabela 7, a cal calcítica está de acordo com as exigências. Já a dolomítica, quando comparada com os padrões de norma da hidratada, é inadequada no que diz respeito ao CaO_T, Ca(OH)₂, e MgO.

3.2 MÉTODOS

Nos próximos itens são descritos os métodos utilizados com o intuito de caracterizar o solo, determinar os teores para estabilização da mistura em estudo, juntamente com os procedimentos de moldagem e compactação. Posteriormente, também são apresentados os métodos empregados para a realização dos ensaios de resistência mecânica, análise mineralógica e microscópica.

3.2.1 Caracterização física, geotécnica e química do solo

Os ensaios de caracterização do solo foram realizados conforme as normativas vigentes. Dessa forma, as amostras de solo foram preparadas para os ensaios de compactação e de caracterização de acordo com o indicado pela NBR 6457 (ABNT, 2016a). O material foi seco ao ar, até próximo da umidade higroscópica e posteriormente quarteado até que fosse alcançada quantidade suficiente para a realização dos ensaios, conforme o indicado pela normativa.

Na sequência, a análise granulométrica das amostras do solo foi realizada de acordo com o preconizado pela NBR 7181 (ABNT, 2018). A normativa indica o procedimento que combina a análise granulométrica por peneiramento e sedimentação.

Para a determinação da massa específica real dos grãos, seguiu-se o procedimento disposto na NBR 6508 (ABNT, 1984). Já para a determinação do limite de plasticidade e liquidez para as amostras de solo *in natura* e com adição de cal seguiu-se o disposto na NBR 7180 (ABNT, 2016a).

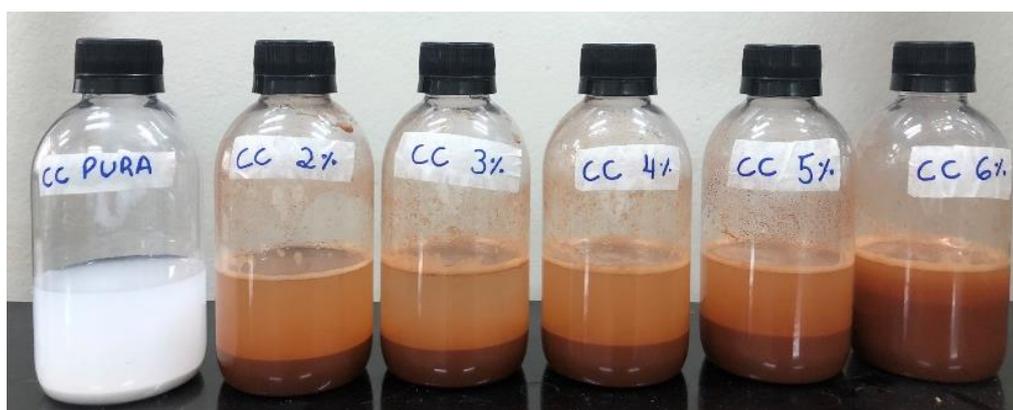
O solo foi classificado de acordo com a classificação para finalidades rodoviárias da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), normatizado pela norma D-3282 da ASTM (2015b). O material também foi classificado pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), seguindo o disposto na normativa D2488-17E01 da ASTM (2015b) e ainda, classificado conforme a metodologia MCT (Miniatura Compactada Tropical). A classificação de Burmister é apresentada, bem como as classificações de acordo com a AASHTO e SUCS.

A caracterização dos parâmetros químicos do solo seguiu a análise química completa do protocolo do Programa de Controle de Qualidade de Análises de Solo da Rede Oficial de Laboratórios de Análises de Solos do RS e SC (ROLAS) da EMBRAPA. Um dos objetivos da ROLAS é padronizar os métodos de análise de solo, adotando controle sistemático de qualidade das análises realizadas.

3.2.2 Seleção dos teores de cal

Com o intuito de selecionar os teores de cal visando a estabilização do solo em estudo foi adotada a metodologia do pH, normatizada pela DNIT-ME 419 (IPR, 2019a) e D6276 (ASTM, 2019). Ambas as normas baseiam-se no método proposto por Eades e Grim, o qual indica que o solo, ensaiado com vários teores de cal tem o objetivo de atingir o pH de 12,4. A norma do DNIT não especifica questões relativas à calibração do medidor de pH e nem à temperatura de ensaio, recomendada em 25 ± 1 °C pela norma da ASTM, logo, todos os aspectos não abrangidos pela norma do DNIT seguiram o disposto na norma da ASTM. A Figura 6 apresenta as amostras para realização do ensaio do método do pH, contemplando as misturas de solo, cal calcítica e água, e cal calcítica e água.

Figura 6: Amostras para realização do ensaio método do pH



A Figura 7 mostra um ensaio em andamento. Foi empregado um pHmetro de bancada digital com compensação automática de temperatura (ATC), com medição de capacidade de 0,00 até 14,00 pH.

Figura 7: Realização do ensaio do pH



Após a realização do ensaio, foram estipulados dois teores (alto e baixo) para a realização dos ensaios de limites de Atterberg com ambas as cales, seguindo o disposto na NBR 6459 (ABNT, 2016b). Para a realização de cada ensaio, foi adicionada umidade correspondente a aproximadamente 10% da umidade ótima, 24 horas antes à adição da cal de forma que se possibilitasse uma melhor homogeneização da mistura. Após a adição da cal, aguardou-se mais uma hora para início do ensaio, possibilitando o intervalo adequado às reações rápidas entre o solo e a cal. Tal procedimento de espera será melhor fundamentado no item 3.2.3.

3.2.3 Compactação

O ensaio de compactação seguiu o preconizado pela NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação (ABNT, 2020). Nessa pesquisa, somente foi utilizada a energia modificada, tendo em vista que o objetivo inicial do estudo foi a estabilização do solo e não a modificação, visto que a energia modificada possibilita maior contato grão a grão.

O solo foi previamente preparado para o ensaio conforme disposto na NBR 6457 (ABNT, 2016). Devido à dificuldade de secagem do solo por causa de sua finura, a utilização da estufa na temperatura de 60 °C tornou-se necessária. Posteriormente, o solo foi destorroado (até que toda a porção fosse passante na peneira 4,8 mm), homogeneizado e quarteado até que se atingisse quantidade suficiente para a realização dos ensaios.

Posteriormente, foram adicionados os respectivos teores de umidade para cada amostra de solo, considerando uma variação de 2% entre os pontos da curva de compactação. As misturas de solo e água foram então reservadas em sacos plásticos durante 24 horas para garantir a homogeneização.

Para o traçado das curvas de compactação, as amostras foram moldadas em um cilindro metálico pequeno (\varnothing 10 cm, h: 13 cm), previamente untado com vaselina sólida para que a desmoldagem fosse facilitada. Foram usadas 5 camadas de compactação (com escarificação entre uma camada e outra) e aplicados 55 golpes por camada, conforme prevê a norma de compactação vigente. O soquete utilizado foi o grande, com massa de 4,536 kg, conforme disposto na normativa.

Após a compactação, o conjunto do molde mais amostra foi pesado, e parte da amostra reservada para verificação da umidade. Posteriormente foram calculados os parâmetros referentes à massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótimo.

Quanto à curva de compactação de solo-cal, um teor de umidade abaixo do estipulado para os pontos da curva de compactação foi adotado para que ocorresse a homogeneização prévia das amostras de solo e água durante 24 horas. Na sequência, completou-se com o teor de cal correspondente à massa de solo seco e a quantidade de água necessária para cada teor de umidade. A mistura de solo, água e cal foi novamente homogeneizada e reservada em sacos plásticos fechados durante uma hora. Posteriormente, os procedimentos para compactação das amostras procederam-se da mesma forma que com o solo normal.

O tempo de espera entre a mistura dos materiais (cal, água e solo) e a compactação torna-se importante devido à simulação dos procedimentos adotados em campo. Essa demora permite a ocorrência das reações rápidas (trocas catiônicas, floculação e aglomeração).

A utilização do período de uma hora de espera entre a mistura dos materiais e a compactação do corpo de prova foi definida de acordo com o previamente utilizado em outros estudos (DEMPSEY; THOMPSON, 1968; THOMPSON; DEMPSEY, 1969; LITTLE; YUSUF, 2001). Além disso, ressalta-se que esse período é o mesmo utilizado no ensaio empregado pelo Método do pH para dosagem das misturas, salientando também que Eades e Grim (1966) indicaram que na maioria das vezes, a troca iônica se completa em uma hora.

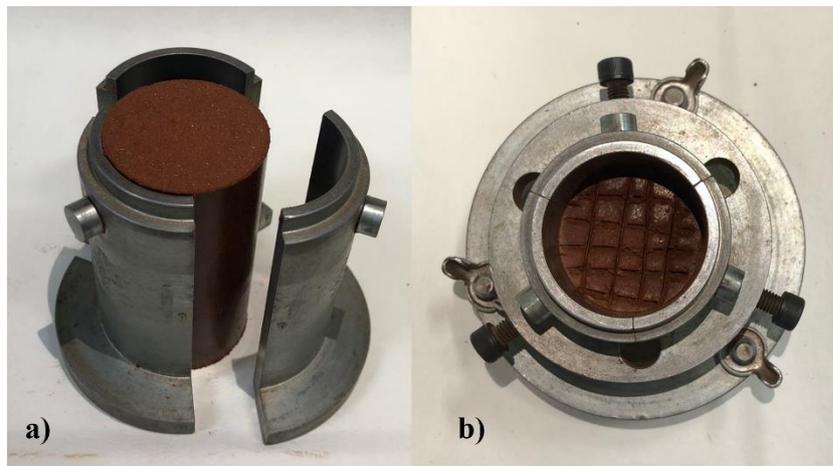
3.2.4 Moldagem dos corpos de prova para ensaios de RCS e RCD

Para moldagem dos corpos de prova cilíndricos com dimensões de 5x10 cm, inicialmente, o solo foi seco ao ar, conforme o disposto na NBR 6457 (ABNT, 2016), posteriormente, seco em estufa, destorroado e peneirado.

Cerca de 10% do teor de água correspondente à umidade ótima previsto para cada corpo de prova foi adicionada nas porções de solo previamente separadas. Cada mistura de solo e água foi homogeneizada e reservada em sacos plásticos devidamente vedados durante 24 horas. Então, a cal foi adicionada, juntamente a umidade restante. Por fim, procedeu-se novamente com a homogeneização e reserva da mistura em sacos plásticos por mais uma hora (considerando as reações iniciais do solo e cal), para que posteriormente fosse realizada a moldagem dos corpos de prova.

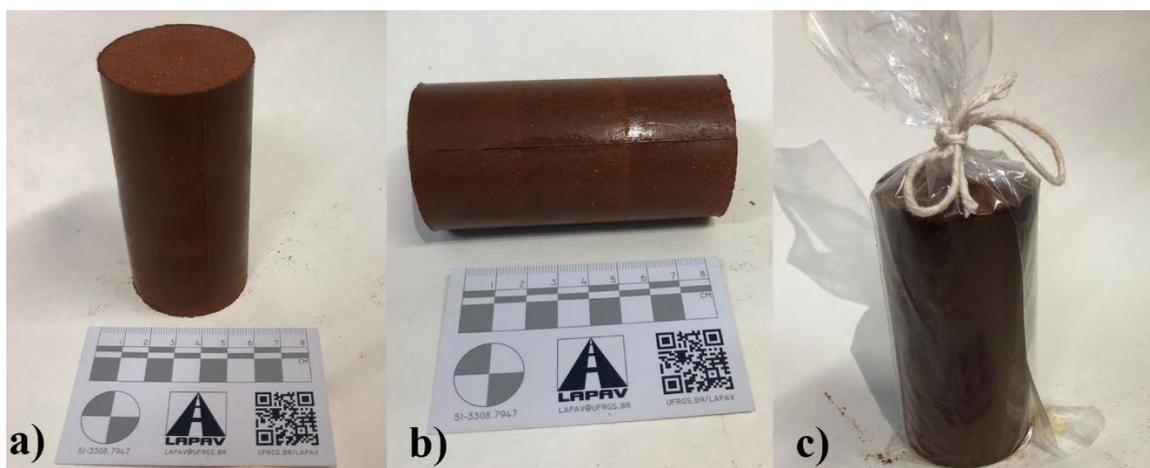
Para moldagem dos corpos de prova cilíndricos utilizados nos ensaios de RCS e RCD, foi utilizado molde metálico tripartido, conforme Figura 8, a (previamente untado com vaselina). Os corpos de prova foram moldados em três camadas iguais, com escarificação entre camadas, conforme pode ser visualizado na Figura 8, b. A moldagem foi realizada em uma prensa mecânica com carregamento monotônico capaz de fornecer a energia prevista.

Figura 8: Moldagem dos corpos de prova de solo-cal



Após a moldagem, as amostras com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura (Figura 9, a e b), foram identificadas e armazenadas em sacos plásticos (Figura 9, c) para que a umidade ótima permanecesse a mesma durante o tempo de cura e reações deletérias (carbonatação) fossem minimizadas. Posteriormente, os corpos de prova foram condicionados em câmara úmida.

Figura 9: Corpos de prova de solo-cal com dimensões de 5x10 cm



A umidade foi aferida após cada moldagem, utilizando as porções de solo remanescentes. Foram descartadas as amostras que tiveram variação para mais ou menos do que 2% da umidade ótima. Outra verificação foi realizada considerando todos os corpos de prova, logo após a realização dos ensaios mecânicos.

3.2.5 Ensaios para determinação da resistência mecânica

Os ensaios propostos para fins de determinação da resistência mecânica das misturas solo-cal são apresentados nessa seção. Foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples (RCS), resistência à compressão diametral (RCD) e resistência à tração na flexão (RTF).

3.2.5.1 Resistência à compressão simples

A resistência à compressão simples das misturas solo-cal é equivalente à tensão de compressão na qual uma amostra cilíndrica não confinada, romperá em um ensaio de compressão axial. No método de ensaio, a resistência à compressão não confinada (simples) é a carga axial máxima atingida por uma unidade de área ou carga/área considerando 5% de deformação axial (ASTM, 2009). A Figura 10 mostra uma amostra logo após a realização do ensaio. A normativa recomenda que o indicador de deformação tenha legibilidade de 0,02 mm ou 0,001 pol., com faixa de percurso suficiente para medir 6% de tensão axial. A taxa de deformação axial deverá ser aplicada em taxas de 0,5 a 2,0 % por minuto.

Figura 10: Corpo de prova de solo-cal após do ensaio de RCS



No caso desse estudo, optou-se por triplicatas das amostras, tendo em vista um melhor ajuste estatístico dos resultados obtidos. Essas triplicatas foram curadas a 7, 28, 90, 120 e 180 dias, devidamente seladas em sacos plásticos e mantidas na câmara úmida do LEME (Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais da UFRGS) sob temperatura de 23 ± 2 °C e umidade superior à 95%. Foi utilizada como peneira de controle a peneira n° 4, com malha de abertura de 0,45 mm.

Os ensaios de RCS foram realizados no Laboratório de Pavimentação da UFRGS (LAPAV), na prensa hidráulica MTS 810. Os corpos de prova foram ensaiados com velocidade de deformação de 1,14 mm/min. Durante a execução de cada ensaio, foi registrada a carga aplicada e a respectiva deformação, anotando-se a carga de ruptura, a fim de determinar a resistência à compressão simples das amostras. Então o carregamento das amostras foi continuado até os valores de carga reduzirem com o aumento da deformação. O critério de parada utilizado foi a queda de 40% da carga aplicada.

3.2.5.2 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral (RCD) foi realizada em amostras cilíndricas de 5x10 cm. Para a realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RCD) foi utilizada a mesma prensa MTS empregada para o ensaio de RCS. No ensaio foram posicionadas tiras de carregamento (*loading strips*), conforme já utilizado por Thompson (1966a) e Kleinert (2021). Essas tiras alteram a distribuição de tensões nos corpos de prova, colaborando para que esses rompam à tração. A resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova foi obtida com posse dos valores referentes à carga de ruptura e às dimensões de cada amostra.

Foram empregadas no cálculo, a média de 4 leituras referentes à altura e 4 leituras referentes ao diâmetro de cada corpo de prova, que devem ser moldados em triplicata. A Equação 16 apresenta o cálculo da resistência à tração por compressão diametral apresentada na normativa.

$$RCD = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H} \quad (16)$$

Onde:

RCD: resistência à tração por compressão diametral, em MPa;

F: carga de ruptura, em N;

D: diâmetro do corpo de prova, em mm;

H: altura do corpo de prova, em mm.

A resistência à tração por compressão diametral das amostras moldadas em laboratório nas mesmas condições é a média aritmética dos valores obtidos pelas três amostras, desde que a variação entre cada um dos valores e a média estejam em um intervalo de $\pm 10\%$ (DNIT, 2018). No ensaio foram moldadas triplicatas, curadas durante 28, 90 e 120 dias nas mesmas condições das amostras de RCS.

A Figura 11 apresenta uma amostra logo após a ruptura no ensaio de tração por compressão diametral. Na imagem, pode ser visualizada a *loading strip* utilizada.

Figura 11: Corpo de prova de solo-cal após ensaio de RCD



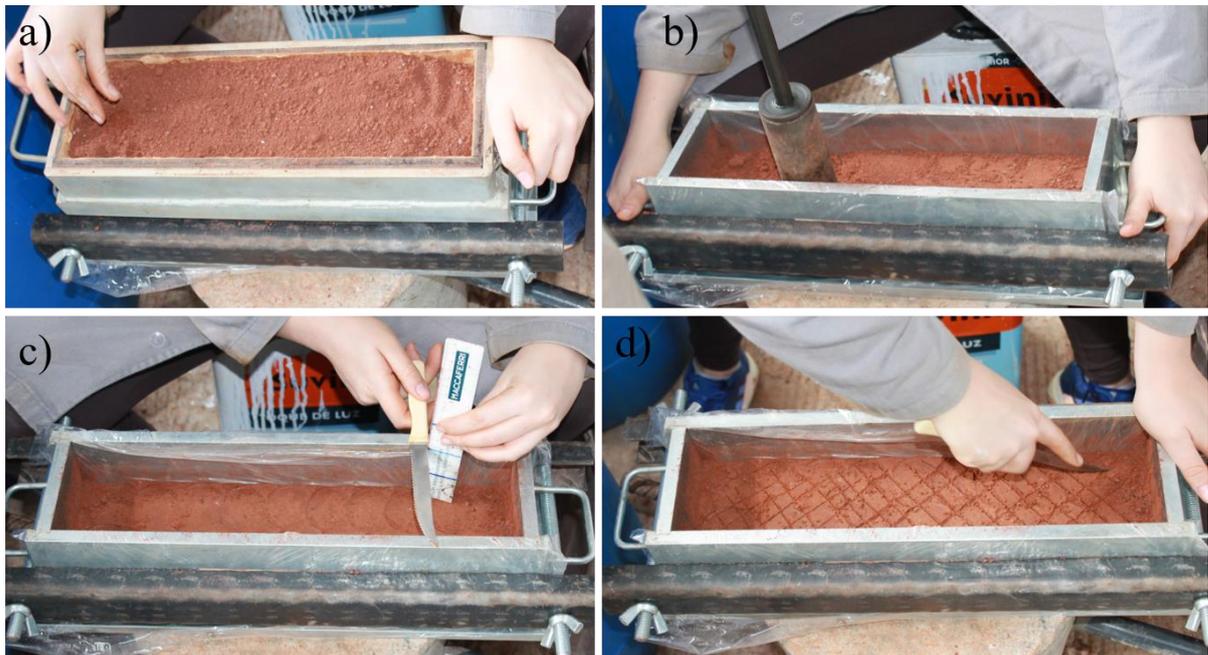
3.2.5.3 Resistência à Tração na Flexão (RTF)

Para esse trabalho foram moldadas vigotas com dimensões de 10x10x40 cm, seguindo o realizado em pesquisas anteriores como a de Castañeda López (2016), Fedrigo (2019) e Kleinert (2021), realizadas no LAPAV. Os procedimentos de moldagem, cura e ensaio foram similares a essas.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada através do controle da altura de três camadas, considerando a densidade máxima. A homogeneização do solo foi realizada conforme a moldagem das outras amostras, conforme item 3.2.4.

Untou-se previamente o molde com óleo vegetal e uma película de plástico filme foi colocada nas paredes internas. Posteriormente, mais uma camada de óleo foi passada nas paredes internas. Então o peso correspondente a uma camada foi depositado no molde e compactado de forma dinâmica através de soquete (conforme imagens a e b da Figura 12). Realizou-se o controle da altura de cada camada através de uma régua plástica, e a mistura foi compactada até que a altura correspondente a 1/3 do molde fosse atingida, conforme pode ser observado na imagem c da Figura 12. Tomou-se o cuidado de realizar-se a escarificação entre as camadas (imagem d).

Figura 12: Passo a passo da moldagem das vigotas de solo-cal



Foram moldadas triplicatas, curadas durante 28 dias. As condições de cura foram as mesmas empregas nas amostras de RCS e RCD.

O ensaio de resistência à tração na flexão foi baseado na normativa D-1635 (ASTM, 2012) indicada para misturas de solo-cimento e no relatório 789 (WEN *et al.*, 2014) da *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP), indicado para materiais estabilizados com diferentes agentes estabilizadores.

O ensaio de RTF seguiu o disposto por Castañeda López (2016), dessa forma, antes de ensaiar a amostra, prendia-se à mesma um suporte tipo “yoke” desenvolvido de acordo com o protocolo SF4 (JSCE-SF4, 1984). No sistema de ensaio, que pode ser visualizado na Figura 13, um transdutor LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) foi posicionado na parte inferior central da vigota, sendo esse responsável pela leitura dos deslocamentos. A taxa de carregamento aplicada foi de 2,3 kN/min. A Equação 17 foi para cálculo da resistência à tração na flexão.

$$RTF = \frac{P \times L}{W \times H^2} \quad (17)$$

Onde:

RTF: resistência à tração na flexão, em MPa;

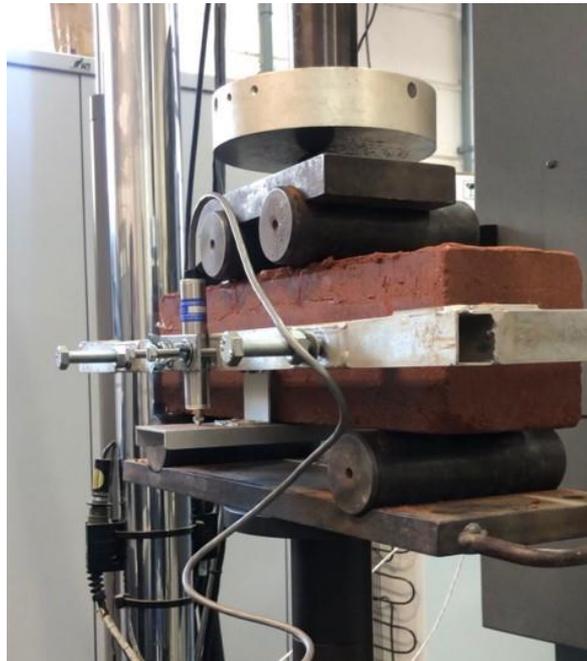
P: força máxima aplicada, em N;

L: comprimento entre os eixos dos cilindros de apoio, em mm;

W: largura da vigota, em mm;

H: altura da vigota, em mm.

Figura 13: Configuração do Ensaio RTF



Segundo o disposto por Kleinert (2021), adaptado das normativas supracitadas, após a ruptura das amostras, foi medida a distância entre a trinca e a extremidade mais próxima da vigota (L_t). Se essa distância fosse inferior a 135 mm, o resultado era descartado, de forma que a Equação 18, só era validada quando a ruptura ocorresse no terço médio da amostra.

Conforme o apresentado pela *Austroads* (2008) para fins de cálculo de deformação na ruptura, a deformação correspondente a 95% da carga de ruptura deve ser considerada, devido à menor variabilidade dos valores de deformação nesse ponto. Dessa forma, a Equação 18 determina a deformação na ruptura, conforme o apresentado pela *Austroads* (2012).

$$\varepsilon_{ruptura} = \frac{108x\delta x H x 1000}{23xL^2} \quad (18)$$

Onde:

$\varepsilon_{ruptura}$: deformação na ruptura, em microstrain;

δ : deslocamento associado a 95% da carga de ruptura, em mm;

L: comprimento entre eixos do cilindro de apoio, em mm;

H: altura da vigota, em mm.

Com base no gráfico tensão-deformação, e por meio da Equação 19, foi possível estimar o módulo de elasticidade na flexão (MEF) para cada mistura. Para isso, a tensão de tração normalizada foi considerada. Ela consiste na relação entre as tensões de tração aplicadas ao longo do ensaio e a resistência à tração na flexão, para o intervalo de 20 a 100% da RTF (CASTAÑEDA LÓPEZ, 2016). Para esse trabalho, o MEF considerado foi o módulo secante no momento em que a carga aplicada equivale a 40% da resistência, conforme recomendado pela *Austrroads* (2008).

$$MEF = \frac{\sigma_j}{\varepsilon_j} \times 10^6 \quad (19)$$

Onde:

MEF: módulo de elasticidade na flexão, em MPa;

σ_j : tensão de tração normalizada, em MPa;

ε_j : deformação correspondente, em *microstrain*.

3.2.6 Ensaios para avaliação da evolução das reações cimentantes

Foram realizadas análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com o intuito de avaliar a nível microscópico a evolução da formação dos produtos cimentantes. Também foram realizadas análises de difração de raios X (DRX) para fins de identificação dos argilominerais presentes no argissolo e consumo desses ao longo do tempo de cura na mistura solo-cal. A espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) foi realizada objetivando a identificação dos elementos químicos presentes no argissolo.

3.2.6.1 Análises MEV

Com o objetivo de analisar as mudanças ocorridas em decorrência da adição da cal ao solo a nível microscópico, foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV). No ensaio, imagens de alta resolução são geradas através de um feixe de elétrons, o que possibilita a verificação da ocorrência de mudanças estruturais e possíveis reações pozolânicas entre os argilominerais presentes no solo e na cal.

Para os ensaios de MEV foram analisadas amostras de solo puro e amostras curadas durante 7, 90, 120 e 180 dias. Foram analisadas as mudanças texturais das misturas ao longo do tempo de cura estipulado por meio de imagens correspondentes a aumentos de 500, 1.500 e 3.000 vezes.

As amostras utilizadas para a MEV foram resultantes de corpos de prova rompidos no ensaio de RCS, extraindo-se desses, pequenos pedaços com aproximadamente 1 cm² o mais planares possível, não sendo feito o processo de lixamento. As amostras foram secas em estufa à 110 °C, até que fosse atingido um valor constante em massa. Posteriormente foram depositadas em sacos plásticos com sachês de sílica gel, com o intuito de que fosse evitado um possível ganho de umidade. Então, para a obtenção das imagens MEV, as amostras passaram pelo processo de metalização.

O processo de metalização foi realizado em um equipamento à vácuo Quorum Q150R ES/Plus. A metalização foi feita com uma fina película de ouro eletro depositada que possibilita melhor condução dos elétrons no equipamento MEV. A Figura 14 mostra uma amostra não metalizada (marrom alaranjado) e outras metalizadas (cinza). Depois disso as amostras foram fixadas em suportes *stubs* com o auxílio de fitas carbono dupla face e conduzidas à análise MEV. As análises MEV foram realizadas em um equipamento modelo MEV/FEG Inspect F50, FEI.

Figura 14: Metalização das amostras para análise MEV



3.2.6.2 *Análises Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)*

Segundo Callister (2008), o MEV varre a superfície da amostra com um feixe de elétrons e esse feixe de elétrons é refletido na mesma taxa de varredura sobre um tubo de raios catódicos, que se assemelha a uma tela de TV. Então uma imagem é gerada, apresentando características da superfície da amostra.

O EDS é um equipamento acoplado ao MEV que permite determinar com precisão a composição química de qualquer material sólido da tabela periódica. Inicialmente é realizada a análise MEV e posteriormente podem ser selecionados pontos ou pequenas áreas para a análise EDS. Considerando que a imagem MEV tem diferentes contrastes devido a intensidade da reflexão dos feixes de elétrons, o EDS faz a distinção dos elementos químicos.

3.2.6.3 *Análises DRX*

A técnica de difratometria de raios X (DRX) é fundamental para a caracterização mineralógica dos argilominerais e de outros componentes cristalinos presentes nas frações mais finas dos solos, como o silte e a argila. Com base na variação angular da incidência de um feixe de raios X oriundo de uma fonte de radiação, as reflexões produzidas pelo arranjo de átomos nos planos cristalinos dos minerais são captadas e representadas graficamente. Esse gráfico gerado relaciona a intensidade da difração dos raios X emitidos com o ângulo de incidência da radiação. Dessa forma, torna-se possível identificar constituintes cristalinos presentes em misturas de materiais por meio da comparação dos picos expressos no DRX (FONTANA; CAMPOS, 2017). A DRX pode ser utilizada com o intuito de identificar os

argilominerais presentes no solo e outros compostos cristalinos formados após a adição de cal e água no solo.

Para a preparação das amostras, os corpos de prova rompidos no ensaio de resistência à compressão simples foram secos em estufa à 110 °C até que fosse atingida a constância de massa. Após isso, foram quebrados e destorroados, até que uma fração de 2 gramas passante na peneira 0,045 mm (n° 325) fosse obtida. Essas frações foram enviadas para análise pelo do método do pó.

As amostras foram ensaiadas em difratômetro de raios X Empyrean Panalytical com configuração reflexão-transmissão com spinner ajustado em duas revoluções por segundo, em um range de 2 a 75° (2 θ), com passo de 0,01 durante 100s, tubo de Cu, e a 40 kV e 40 mA. Foi utilizada geometria de feixe incidente Bragg-Brentano HD, fenda soller 0,02 rad, máscara fixa de 20 mm, fenda fixa anti-espalhamento de 1/4" e fenda fixa divergente de 1/16". No feixe difratado foi montada fenda anti-espalhamento 7,5 mm e fenda soller de 0,02 rad. O difratômetro foi equipado com detector de área PIXcel 3D Medipix3 com 255 canais.

3.2.6.4 *Análise FRX*

A análise de fluorescência de raios X (FRX) foi realizada para identificação e semi-quantificação dos elementos maiores em forma de seus óxidos em concentrações significativas: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ (total), MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂, P₂O₅. De forma geral, a análise FRX identifica os elementos químicos presentes nas amostras, diferentemente das análises DRX que é responsável por identificar a estrutura cristalina dos minerais.

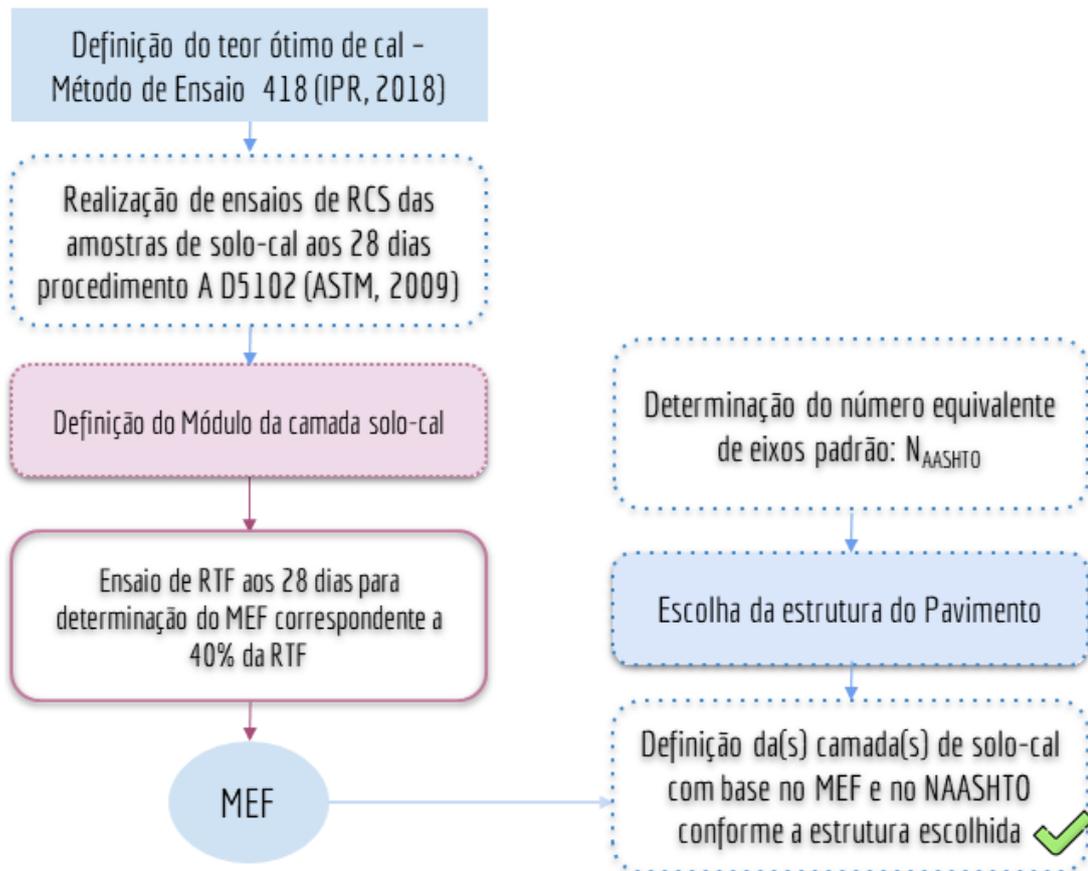
A amostra de 2g fornecida para o ensaio foi seca e passada na peneira n° 200. O ensaio foi realizado somente para o argissolo *in natura*, tendo em vista que o intuito do ensaio foi somente a identificação dos elementos químicos, que não sofrem alteração.

Para as análises FRX foi utilizado um equipamento Epsilon 1 com a metodologia Omnic (semi-quantitativa). Quanto às condições de análise, foi utilizado anodo de Ag, 50 kV, μ A: 100, filtro: Cu-500 e detector SDD5.

3.2.7 **Análises mecánicas**

Foram realizadas análises mecânicas com o intuito de avaliar os efeitos no comportamento estrutural de pavimentos a partir da adição de cal nas camadas de base e sub-base. As etapas seguiram o passo a passo do guia proposto por Kleinert (2021), conforme as Figuras 15 e 16.

Figura 15: Fluxograma para pré-dimensionamento de pavimentos contendo camadas de solos tropicais estabilizados com cal



Fonte: adaptado de Kleinert (2021)

Figura 16: Fluxograma da sequência das análises mecânicas



Fonte: adaptado de Kleinert (2021)

Para emprego em base e sub-base, foram considerados os resultados obtidos para as duas misturas de solo com 5% de cal curadas durante 28 dias. Como material de subleito, foi considerado o solo natural compactado na energia normal. Conforme o proposto por Kleinert (2021), foram utilizados nas análises mais dois materiais: concreto asfáltico (CA) e brita graduada simples (BGS).

Foram definidas três estruturas, apresentadas nas Figuras 17, 18 e 19, para as estruturas 1, 2 e 3, respectivamente. As espessuras das camadas seguiram a metodologia usada por Kleinert (2021). Conforme realizado pela autora, também foram estudadas estruturas em que as camadas de solo-cal foram substituídas por camadas granulares (BGS).

Figura 17: Estrutura 1 - pavimento semirrígido invertido (sub-base em solo-cal)



Fonte: adaptado de Kleinert (2021)

Figura 18: Estrutura 2 – pavimento semirrígido (base e sub-base em solo-cal)



Fonte: adaptado de Kleinert (2021)

Figura 19: Estrutura 3 – pavimento semirrígido (base em solo-cal)



Fonte: adaptado de Kleinert (2021)

A escolha das espessuras deu-se em função do estudo do comportamento das camadas de solo-cal em pavimentos com revestimentos delgados e espessos, 5 a 20 cm, respectivamente. Sendo que a espessura de 12,5 cm representa uma espessura intermediária. A ideia da Estrutura 1 (Figura 17) é de que funcione como uma estrutura semirrígida invertida, por isso a inclusão de uma camada granular (BGS) entre o revestimento e a sub-base cimentada. Já a Estrutura 2 (Figura 18) não apresenta camada granular (BGS) e por isso pode ser considerada semirrígida. A Estrutura 3 (Figura 19), também semirrígida, tem como sub-base a BGS e como material de base, a mistura solo-cal.

Ainda conforme o exposto por Kleinert (2021), a camada de BGS foi fixada em 15 cm tendo em vista que o foco do estudo não é a influência dessa na estrutura do pavimento. Foi realizada a variação da camada de sub-base com espessuras entre 20 e 40 cm, variando-se a espessura de 2 em 2 cm nas situações em que a camada cimentada resultou em efeito significativo no desempenho estrutural. Para outras situações, foram analisadas estruturas considerando-se a sub-base com 3 espessuras: 20, 30 e 40 cm.

Em relação à Estrutura 2 (Figura 18), que é semirrígida, adotou-se o mesmo critério da Estrutura 1 (Figura 17). Quando as espessuras de base e sub-base eram diferentes, a maior espessura foi atribuída à camada de sub-base. Além disso, como ambas camadas são constituídas pelo mesmo material, os resultados foram apresentados considerando o somatório das espessuras de base e sub-base, ou seja, entre 20 e 60 cm.

A Estrutura 3 (Figura 19) é composta por revestimento asfáltico variando de 5 a 20 cm, base de solo-cal, variando de 20 a 40 cm. E sub-base de BGS com espessura fixa em 15 cm.

A partir das informações supracitadas foram realizadas análises no Programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), componente do programa MeDiNa. Foi considerado o eixo-padrão rodoviário ou eixo simples de rodas duplas (ESRD) de 8,2 toneladas. Analisou-se as tensões e deformações entre as duas rodas e abaixo de uma das rodas, considerando a pior das situações.

Com base nos valores das deformações e tensões críticos foi possível estimar o número de solicitações que as três estruturas suportariam antes da ruptura, além de conhecer os mecanismos de ruptura. Para isto, os modelos de previsão propostos pelo *South African National Roads Agency Limited* foram utilizados. Conforme Kleinert (2021), foi adotado um

nível de confiabilidade de 90%, considerando-se como a menor vida útil, o menor valor de $N_{\text{crítico}}$.

3.2.7.1 Características dos Materiais Empregados

Conforme estudo apresentado por Kleinert (2021), o MEF de misturas solo-cal pode ser calculado substituindo-se a RCS aos 28 dias na Equação 20. Diante disso, a Tabela 8 apresenta os valores de RCS obtidos e respectivos MEF calculados, como também os MEF obtidos experimentalmente, no caso das misturas 5% CC e CD.

$$MEF = 562,123e^{0,6364XRCS} \quad (20)$$

Tabela 8: MEF obtidos e calculados

Mistura	RCS (MPa) obtido	MEF (MPa) calculado	MEF (MPa) obtido	Variação MEF calculado x MEF obtido (%)
CC5%	2,11*	2153	1617*	25
CD5%	1,19*	1199	1013*	15
CC3%	1,43*	1397	-	-
CD3%	1,58*	1536	-	-

*Os resultados serão discutidos no Capítulo 4

Visando a utilização do argissolo *in natura* como subleito do pavimento nas análises mecânicas, foram realizados ensaios triaxiais com corpos de prova moldados na energia normal. Utilizou-se o modelo composto (conforme Equação 21). A Tabela 9 apresenta os coeficientes utilizados e a significância do modelo empregado.

$$MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \times \sigma_d^{k_3} \quad (21)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, em MPa;

σ_3 = tensão confinante, em MPa;

σ_d = tensão desvio, em MPa.

Tabela 9: Coeficientes e significância do modelo composto para determinação do MR do argissolo *in natura*

k1:	34,763
k2:	0,182
k3:	-0,290
R ² :	0,806

A Tabela 10 apresenta os parâmetros de entrada no *software* AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas). Esses mesmos parâmetros, com exceção das misturas de base e sub-base com cal foram os mesmos utilizados por Kleinert (2021). Dessa forma, foram empregados para revestimento os parâmetros do concreto asfáltico (CA) de granulometria contínua com ligante convencional (CAP 50/70) estudado por Godoi (2017) e para base granular os parâmetros da brita graduada simples (BGS) estudada por Malysz (2009).

Tabela 10: Características dos materiais empregados nas análises mecânicas

Emprego	Material	Massa específica - ρ (g/cm ³)	Linear (MPa)	Módulo (MPa)			Coeficiente de Poisson - μ
				k ₁	k ₂	k ₃	
Revestimento	CA CAP 50/70*	2,41	3032	-	-	-	0,30
Base Granular	BGS**	2,65	-	2303	0,2228	0,759	0,35
Base ou Sub- base cimentada	CC5%	1,822	1617	-	-	-	0,20
	CC3%	1,838	1013	-	-	-	0,20
	CD5%	1,844	1397	-	-	-	0,20
	CD3%	1,856	1536	-	-	-	0,20
Subleito	SP	1,52	-	34,763	0,182	-0,29	0,40

* GODOI (2017)

** MALYSZ (2009)

Ainda, seguindo o procedimento realizado por Kleinert (2021), as respostas estruturais calculadas com o *software* AEMC foram usadas nos modelos da *South African Mechanistic-Empirical Design Method* (SAMDM, 2014). Dessa forma, para as camadas granulares, que podem sofrer ruptura por cisalhamento, é necessário dispor de parâmetros de resistência ao cisalhamento. No caso da BGS, o ângulo de atrito usado foi 60° e a coesão de foi de 71 kPa (MALYSZ, 2009). Para a avaliação da fadiga e esmagamento das camadas cimentadas, as

características empregadas são: $\epsilon_{ruptura}$ e RCS, respectivamente. Essas características são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11: Características dos materiais consideradas nas análises mecânicas

Material	RCS _{28dias} (MPa)	$\epsilon_{ruptura}$ (microstrain)
CC5%	2,11	214
CC3%	1,43	-
CD5%	1,19	283
CD3%	1,58	-

Os próximos tópicos apresentam as equações utilizadas para o cálculo da menor vida útil, valor N. São apresentadas as equações referentes às camadas asfálticas (fadiga), camadas granulares (ruptura por cisalhamento), camadas cimentadas (esmagamento inicial e avançado, e fadiga) e subleito (deformação permanente).

Os próximos tópicos apresentam as equações utilizadas para o cálculo da menor vida útil, valor N. São apresentadas as equações referentes às camadas asfálticas (fadiga), camadas granulares (ruptura por cisalhamento), camadas cimentadas (esmagamento e fadiga) e subleito (deformação permanente).

3.2.7.2 Camadas Asfálticas

As Equações 22 e 23 apresentam o modelo de cálculo para a vida de fadiga das camadas asfálticas.

$$N_f = FE \times 10^{\alpha \left(1 - \frac{\log \epsilon_t}{\beta}\right)} \quad (22)$$

$$FE = 0,0489 \times t - 0,2225 \quad (23)$$

Onde:

N_f : vida de fadiga;

α e β : constantes, de acordo com a espessura da camada, as características do material (granulometria ou MR) e nível de confiabilidade;

ϵ_t : deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada asfáltica, em microstrain;

FE: fator de espessura relacionado à propagação das trincas, sendo adotada a equação 23, para espessuras iguais ou superiores a 25 mm, caso contrário, se considera como 1;

t: espessura da camada asfáltica, em mm.

Nesse caso, como o nível de confiabilidade adotado foi de 95% e a camada de revestimento de CBUQ com módulo de 3032 MPa, se essa tivesse espessura igual a 50 mm, adotou-se α : 17,40 e β : 3,40, e se maior de 50 mm, α : 15,77 e β : 3,34.

3.2.7.3 Camadas granulares

As equações 24 e 25 apresentam os modelos para obtenção do número N a partir do qual ocorrerá a ruptura ao cisalhamento das camadas granulares, considerando a umidade como moderada.

$$N = 10^{(\alpha F + \beta)} \quad (24)$$

$$F = \frac{\sigma_3 \left[K \left(\tan^2 \left(45 + \frac{\Phi}{2} \right) - 1 \right) \right] + 2Kc \tan \left(45 + \frac{\Phi}{2} \right)}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (25)$$

Onde:

N: número equivalente de eixos padrão para proteção contra resistência ao cisalhamento;

α e β : constantes relacionadas ao nível de confiabilidade;

F: relação de tensões, obtida pela equação 25;

σ_1 e σ_3 : tensões principais maior e menor atuando na metade da camada granular (kPa);

C: coesão (kPa);

Φ : ângulo de atrito (°);

K: constante relacionada à umidade.

3.2.7.4 Camadas cimentadas

A Equações 26 apresenta o mecanismo de ruptura por esmagamento avançado na camada cimentada e as equações 27 e 28, a vida de fadiga efetiva.

$$N_{ea} = 10^{\alpha \left(1 - \frac{\sigma_v}{b \text{RCS}}\right)} \quad (26)$$

$$N_{ef} = FE \times 10^{c \left(1 - \frac{\varepsilon}{d \varepsilon_{ruptura}}\right)} \quad (27)$$

$$FE = 10^{(0,00285t - 0,293)} \quad (28)$$

Onde:

N_{ea} : número equivalente de eixos padrão para esmagamento avançado;

σ_v : tensão vertical de compressão no topo da camada (kPa);

RCS: resistência à compressão simples (kPa);

a e b: constantes relacionadas ao nível de confiabilidade;

N_{ef} : vida de fadiga efetiva;

ε : deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada, em microstrain;

$\varepsilon_{ruptura}$: deformação na ruptura, em microstrain;

c e d: constantes relacionadas ao nível de confiabilidade;

FE: fator de espessura relacionado à propagação das trincas, sendo adotada a equação 28 para espessuras entre 10,2 e 41,9 cm;

t: espessura da camada cimentada, em mm.

3.2.7.5 Subleito

A Equação 29 apresenta o modelo utilizado para a verificação do número equivalente de eixos padrão a partir do qual ocorre a deformação permanente do subleito. Para isso foi adotada a profundidade de 10 mm de afundamento.

$$N_{dp} = 10^{(a - 10 \log \varepsilon_p)} \quad (29)$$

Onde:

N_{dp} : número equivalente de eixos padrão para definir o nível de deformação permanente;

ε_v : deformação vertical de compressão no topo da camada, em mm;

a: constante relacionada ao nível de confiabilidade e à profundidade do afundamento gerado pela deformação permanente.

Como o nível de confiabilidade adotado foi de 95% e a profundidade de deformação de 10 mm, a constante a adotada foi 33,70.

4 RESULTADOS

Esse capítulo apresenta os resultados dos ensaios e as respectivas análises.

4.1 ANÁLISE DO SOLO

Esse item apresenta a análise química e por fluorescência de raios X (FRX), e a caracterização física e geotécnica do solo.

4.1.1 Análise Química do solo

A análise química é apresentada na Tabela 12 e discutida em sequência.

Tabela 12: Análise Química do solo

Parâmetro	Solo
Argila (%)	> 60
pH (H ₂ O)	4,4
Índice SMP	5,1
P (mg/dm ³)	1,1
K(mg/dm ³)	25,0
Matéria orgânica (%)	0,6
Al trocável (cmol _c /dm ³)	3,0
Ca trocável (cmol _c /dm ³)	1,0
Al + H (cmol _c /dm ³)	12,3
CTC (cmol _c /dm ³)	14,2
Saturação por bases (%)	14,0
Saturação por alumínio (%)	60,3
Relação Ca/Mg	1,1
Relação Ca/K	16,0
Relação Mg/K	14,0
S (mg/dm ³)	0,3
Zn (mg/dm ³)	0,3
Cu (mg/dm ³)	0,6
B (mg/dm ³)	0,3
Mn (mg/dm ³)	7,0

O solo apresentou alto teor de argila no horizonte B, sendo essa classificada como de atividade baixa (Tb). Quanto ao valor de pH (dissolvido em água) o solo caracteriza-se como sendo fortemente ácido, indicando presença de Al trocável. Já o baixo teor de fósforo (P), indica a classe textural rugosa argilosa do material.

Baixos valores de potássio (K), como é o caso, indicam a presença de minerais intemperizados. Quanto aos valores apresentados para Alumínio (Al), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) trocáveis, estes se apresentam como: alto, baixo e médio. Sendo que, se altas (caso do Al), as bases trocáveis indicam alto grau de intemperismo do solo.

Se maiores que $15 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$, os valores da capacidade de troca catiônica (CTC) indicam a presença de argilominerais do tipo 2:1. No caso do solo em estudo o valor da CTC equivale a $14,2 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$, classificando-se como média, conforme critérios da EMBRAPA. Conforme o apresentado por Schroeder (1969), devido ao valor obtido para a CTC, o material possivelmente tem na sua composição argilominerais como a clorita e caulinita.

Segundo critérios da EMBRAPA, para que sejam classificados como argissolos, o horizonte B pode conter argilas de atividade alta ou baixa desde que apresentem baixa saturação por bases (neste caso 14%) e caráter alumínico, ou seja, saturação por bases inferior a 50% e saturação por alumínio maior ou igual a 50%. No primeiro nível categórico o material é considerado como sendo um “Argissolo”. No segundo como sendo “vermelho” devido à matiz 2,5Y ou mais vermelho na maior parte dos primeiros 100cm. Já no terceiro nível categórico como sendo “Alumínico” pois apresenta essa propriedade na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B, inclusive BA. Dessa forma, o solo em estudo pode ser considerado como sendo um Argissolo Vermelho Alumínico típico.

4.1.2 FRX

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos através da análise por fluorescência de raios X semi-quantitativa.

Tabela 13: Análise por FRX semi-quantitativa

Óxido	% massa
MgO	8,854
Al ₂ O ₃	25,833
SiO ₂	48,975
K ₂ O	1,025
CaO	0,098
TiO ₂	0,833
MnO	0,008
Fe ₂ O ₃	6,017
SrO	0,006
ZrO ₂	0,045
Lol	2,430

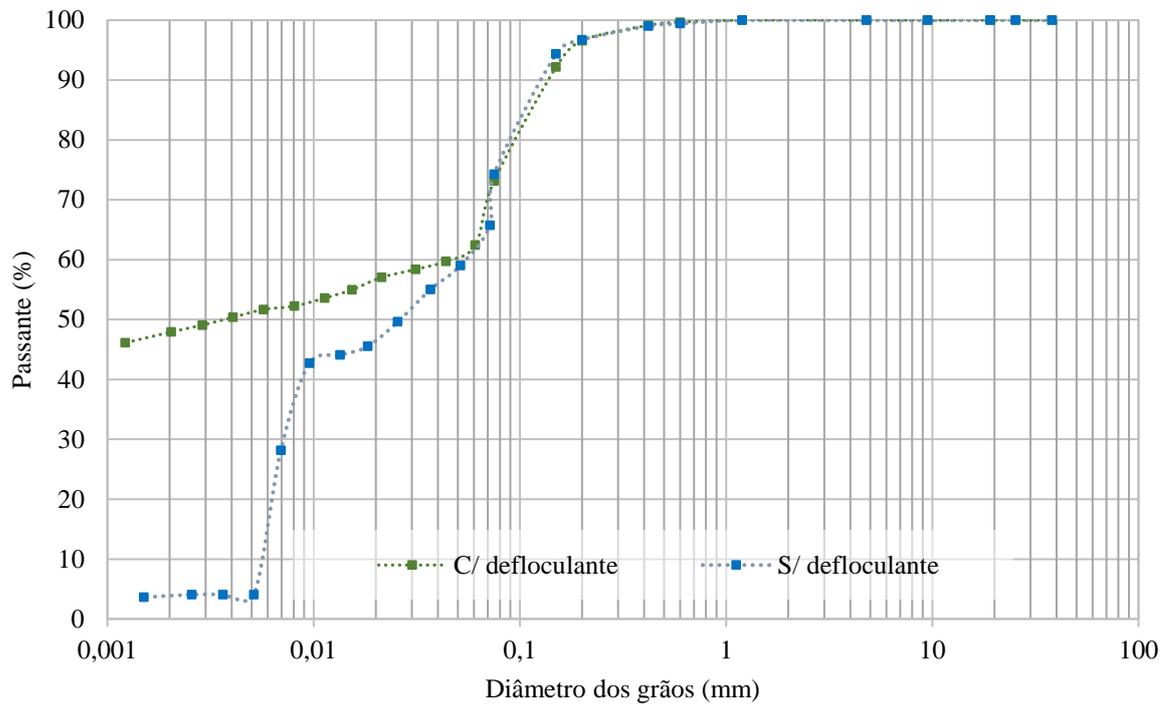
As maiores porcentagens em massa de óxidos encontrados no solo seguiram a seguinte ordem: Si, Al, Mg e Fe. Não foram encontrados metais pesados. Ressalta-se o alto percentual de óxido de magnésio do solo. O alto teor de SiO₂ é compatível com o resultado do DRX (apresentado no item 4.5.2), que apontou a presença de quartzo. O óxido de ferro ajuda a conferir a cor avermelhada ao solo.

4.1.3 Caracterização física do solo

Os ensaios de granulometria foram realizados com e sem a utilização de defloculante, resultando nas curvas granulométricas apresentadas na Figura 20. O Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade obtidos foram de 51 e 26, respectivamente. Dessa forma, pela classificação da AASHTO, o solo é classificado como sendo A-7-6, solo argiloso. O comportamento geral como subleito é de fraco a pobre, sendo um solo plástico que tende a sofrer variações de volume. A classificação não é alterada pelo uso ou não do defloculante.

De acordo com a classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos), o solo é classificado como sendo um solo fino, denominado como CH (argila inorgânica de alta compressibilidade).

Figura 20: Granulometria do solo em estudo



A análise granulométrica baseada na NBR 6502 (ABNT 1993) é apresentada na Tabela 14 com base nos ensaios com e sem defloculante. A realização do ensaio de granulometria por sedimentação sem defloculante é importante para fins de representação do solo em campo. Pode-se observar que sem a utilização do defloculante quase não há argila, além de alto percentual de silte, oriundo das agregações, desfeitas pelo defloculante.

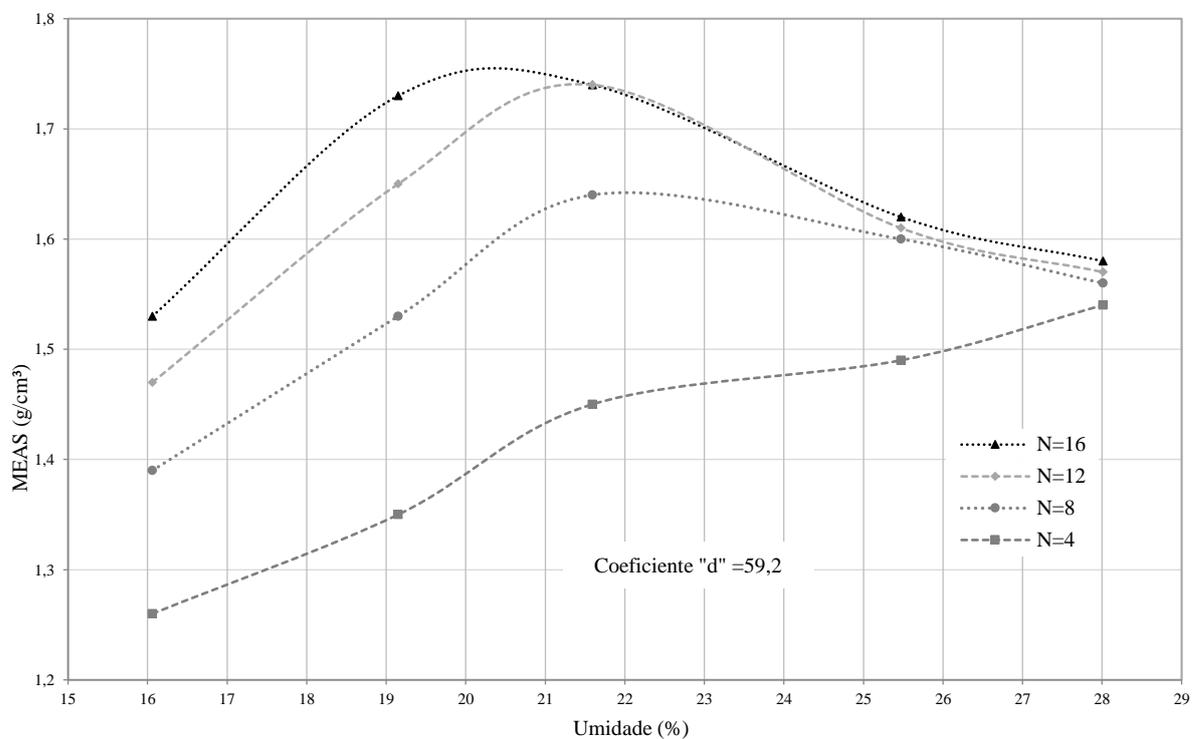
Tabela 14: frações granulométricas conforme a NBR 6502

Frações	c/ defloculante	s/ defloculante
Pedregulho (%)	0,00	0,00
Areia grossa (%)	0,00	0,18
Areia média (%)	1,43	1,28
Areia fina (%)	36,16	32,80
Silte (%)	14,48	61,67
Argila (%)	47,93	4,07

Conforme o diagrama Triangular de FERET, o solo pode ser classificado como solo argiloso quando feita a granulometria com defloculante, e como solo franco siltoso sem defloculante.

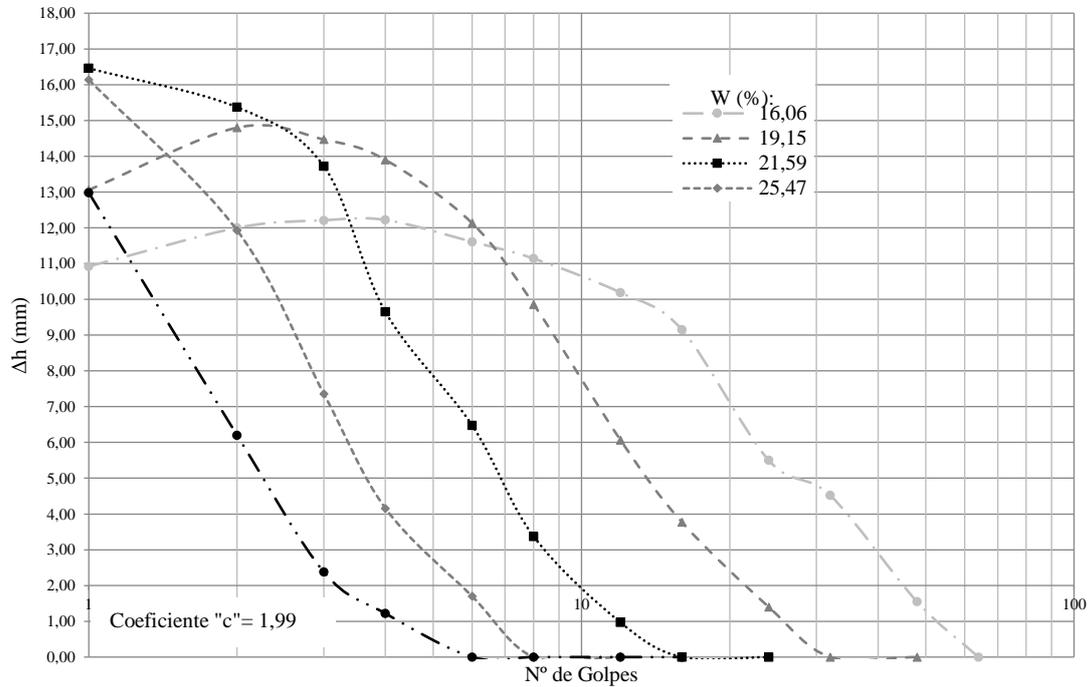
A Figura 21 apresenta os resultados dos ensaios de compactação Mini-MCV, contendo no eixo x os valores referentes à umidade e em y massa específica aparente seca (MEAS). O valor encontrado para o coeficiente d' (inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação correspondente a 12 golpes) foi 59,2. O valor de perda de massa por imersão (P_i) foi 73%. Logo, o valor obtido para o coeficiente e' (calculado a partir de P_i e d') foi de 1,02.

Figura 21: Curvas de compactação Mini-MCV



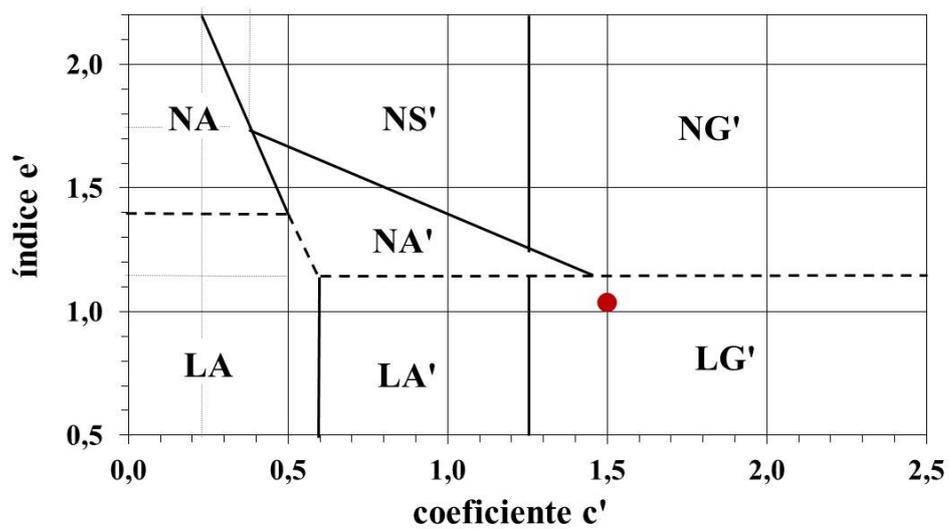
A Figura 22 apresenta as curvas de deformabilidade Mini-MCV obtidas. O coeficiente c' foi obtido por meio do coeficiente angular da parte retilínea da curva de deformabilidade que mais se aproxima do valor Mini-MCV igual a 10. Esse coeficiente indica a argilosidade do solo, se acima de 1,5 caracteriza argilas e solos argilosos. Conforme o valor obtido, igual a 1,99, o material trata-se de um solo argiloso.

Figura 22: Curvas de deformabilidade Mini-MCV



A Figura 23 apresenta a classificação MCT do solo em estudo. O solo foi classificado como sendo LG', ou seja, solo argiloso laterítico.

Figura 23: Classificação MCT do solo



4.2 DOSAGEM DAS MISTURAS

As Figuras Figura 24 e Figura 25 apresentam os Limites de Atterberg do solo puro (SP) e das misturas de solo-cal, com o intuito de observar as mudanças nos limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP), e índice de plasticidade (IP) com a adição da cal.

Figura 24: Limites de Atterberg para SP e Mistura CD

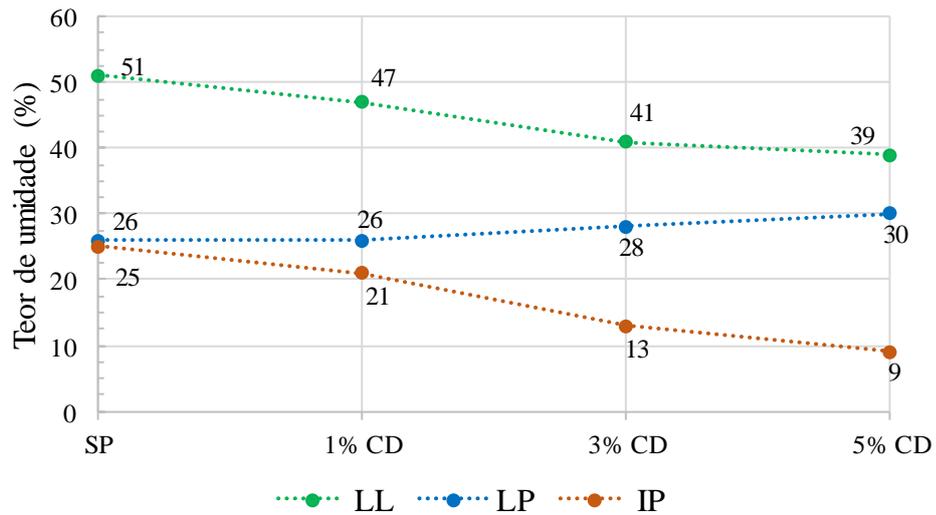
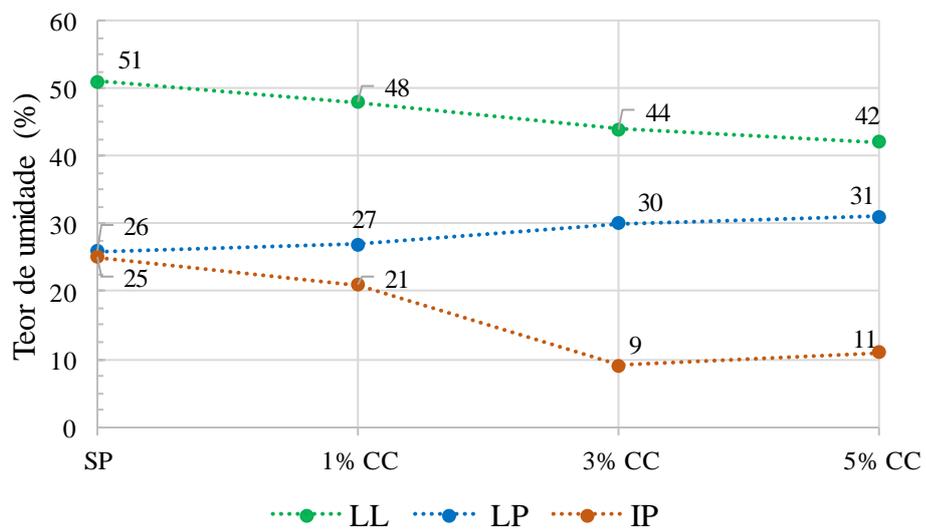


Figura 25: Limites de Atterberg para SP e Mistura CC



Com base nos resultados obtidos, observou-se redução no limite de liquidez para todas as misturas em relação ao solo puro. Em relação aos valores obtidos para o limite de plasticidade, nota-se um pequeno aumento quando incorporados os diferentes teores de cal ao

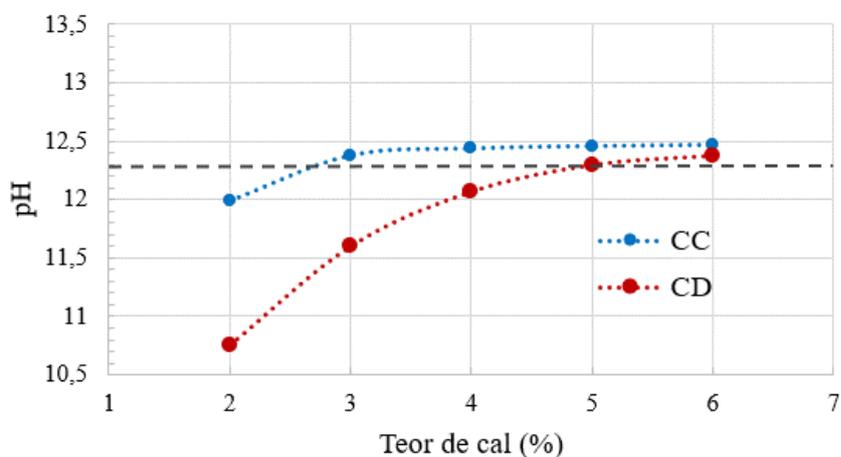
solo. Já para os índices de plasticidade, observou-se considerável redução quando se compara o solo puro com as misturas de solo-cal.

Thompson (1967) e Wang *et al.* (1962) também observaram a diminuição do índice de plasticidade para misturas de solo com cal calcítica e dolomítica, obtendo maiores reduções com o emprego da cal calcítica. Entretanto, essa não foi uma constatação para o solo desse estudo, já que os valores encontrados foram muito similares.

Outros trabalhos como o de Sharma *et al.* (2018), Amadi e Okeiyi (2017), e Thomé (1994) apresentaram limites de plasticidade e liquidez com tendências de aumento e redução, respectivamente, conforme os encontrados nas Figuras Figura 24 e Figura 25. A redução do limite de liquidez e aumento do limite de plasticidade também foram observadas em uma mistura de um solo expansivo e cal virgem, por Dash e Hussain (2012). Conforme os autores, com a adição da cal, os íons de Ca^+ são liberados na água entre os poros. Como resultado disso, a concentração de eletrólitos na água entre esses poros aumenta, diminuindo a espessura da dupla camada difusa dos argilominerais presentes no solo e por consequência reduzindo o limite de liquidez. Ou seja, a mudança na trabalhabilidade é ocasionada pela troca catiônica que ocorre através dos íons de cálcio liberados pela cal e íons metálicos da estrutura da argila.

Para o método do pH, ensaiaram-se misturas de solo de 2 a 6% de cal calcítica e dolomítica. Conforme a Figura 26, pode-se observar que a cal calcítica apresentou melhor interação com os argilominerais do solo, mostrando-se bem mais reativa. O teor alvo de pH estimado para fins de estabilização (12,3) foi alcançado com o teor de 3% de cal calcítica, mantendo-se estável até 6%. Já para a cal dolomítica, o valor de pH alvo só foi alcançado com adição de 5%.

Figura 26: Resultados da dosagem pelo Método do pH



Dessa forma, optou-se por trabalhar com 3% como teor baixo e 5% como teor alto para ambas as cales, buscando-se a padronização dos teores empregados para fins comparativos. Outro motivo da escolha dos teores foi que os mesmos foram utilizados em uma pesquisa de doutorado que já estava em andamento. Nessa pesquisa, Kleinert (2021) estudou três diferentes solos, realizando ensaios semelhantes aos realizados nessa pesquisa.

4.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

A Figura 27 contempla as curvas de compactação do solo puro e das demais misturas plotadas na mesma escala para fins comparativos. A Tabela 15 contém os dados relativos aos parâmetros ótimos de compactação na energia modificada, para o solo puro e misturas solo-cal.

Figura 27: Curvas de compactação na energia modificada: solo-cal calcítica, solo-cal dolomítica e solo puro

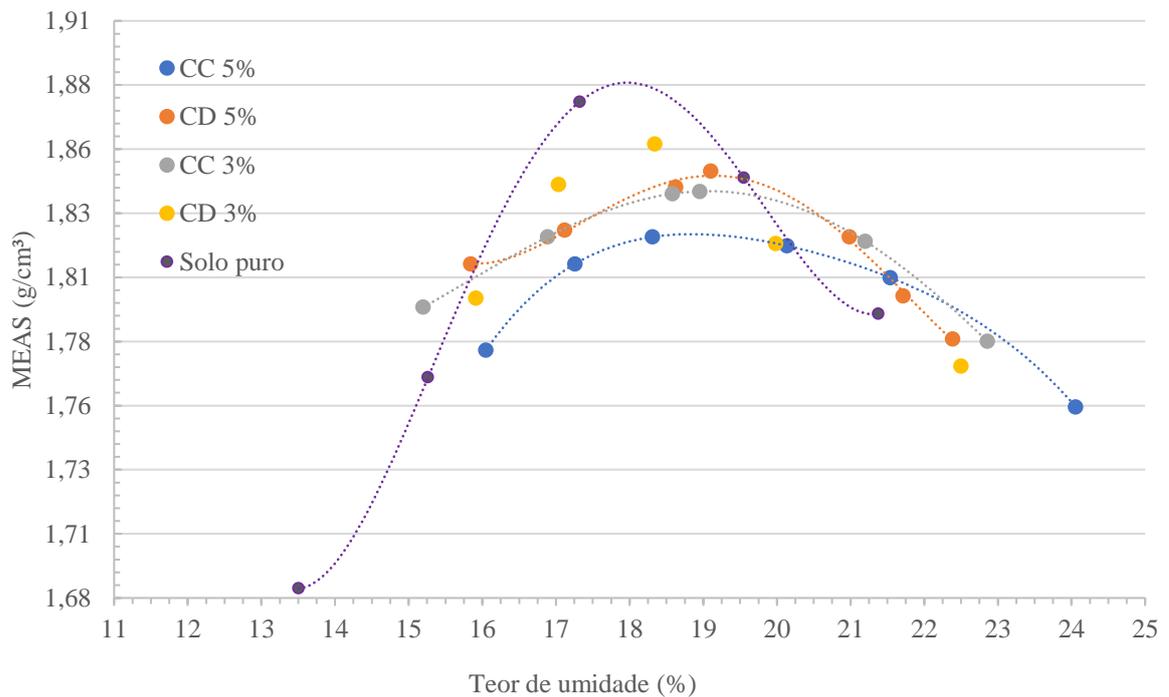


Tabela 15: Parâmetros ótimos de compactação

Parâmetros ótimos		
Mistura	$\omega_{\text{óti}}$ (%)	MEAS (g/cm ³)
Solo puro	17,90	1,875
CD 3%	18,10	1,856
CD 5%	19,60	1,844
CC 3%	18,95	1,838
CC 5%	18,90	1,822

Com base nas curvas obtidas, pode-se observar a redução da massa específica aparente seca máxima, MEAS (g/cm³), quando adicionados os teores alto e baixo (3% e 5%), tanto para a cal calcítica, quanto para a cal dolomítica. Salientando que as maiores reduções ocorrem para as misturas de solo e cal calcítica. Em relação à umidade ótima ($\omega_{\text{óti}}$), observou-se a que a adição de ambas as cales no solo gerou aumento dessas, considerando que os maiores aumentos foram observadas para os teores de cal calcítica, 3 e 5%, respectivamente.

Conforme Abdi *et al.* (2021), a adição de cal em argilas cauliníticas com diferentes plasticidades resultou no aumento do teor de umidade ótimo e na redução da massa específica

aparente seca máxima das misturas solo cal. Tal constatação também foi feita em outros solos por autores como Amadi e Okeiyi (2017) e Sharma *et al.*(2018).

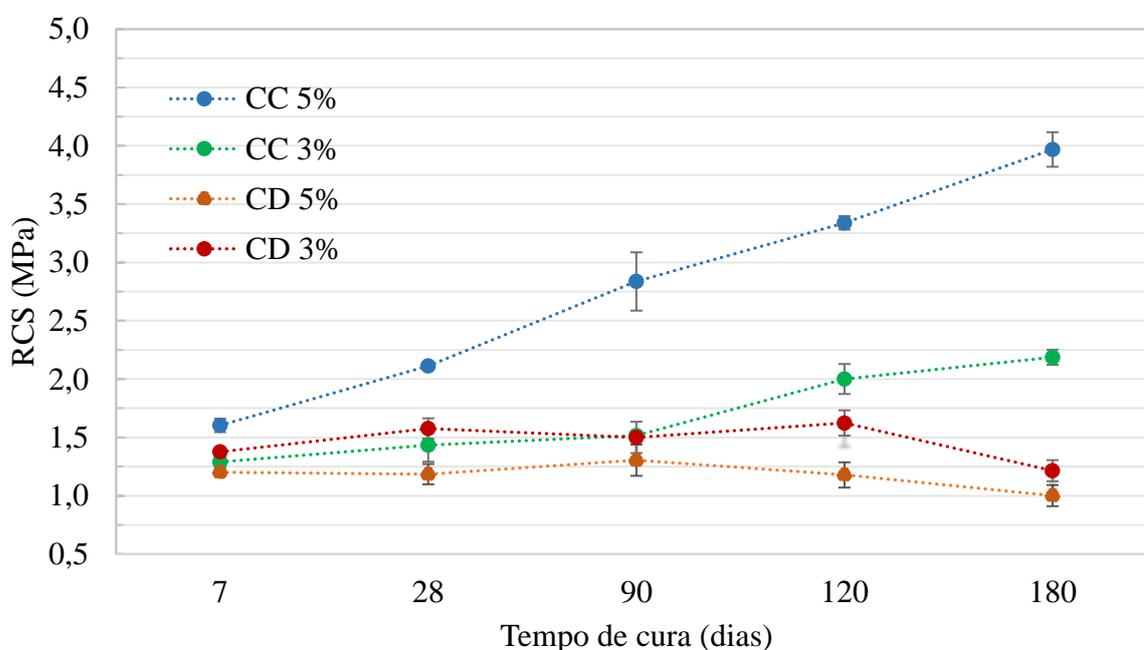
Segundo vários autores, a redução da massa específica aparente seca máxima se dá devido às reações imediatas (floculação e aglomeração) entre a cal e o solo e o aumento da umidade ótima ocorre em decorrência do aumento da fração fina (aumento da superfície específica) e da hidratação da cal (AMADI; OKEIYI, 2017; SHARMA *et al.*, 2018).

4.4 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA

4.4.1 Resistência à compressão simples (RCS)

Os resultados referentes à média das resistências à compressão simples (RCS) para cada mistura estudada são apresentados na Figura 28. Os desvios padrão de cada triplicata estão representados por meio de barras de erros.

Figura 28: RCS das misturas solo-cal em função do tempo de cura

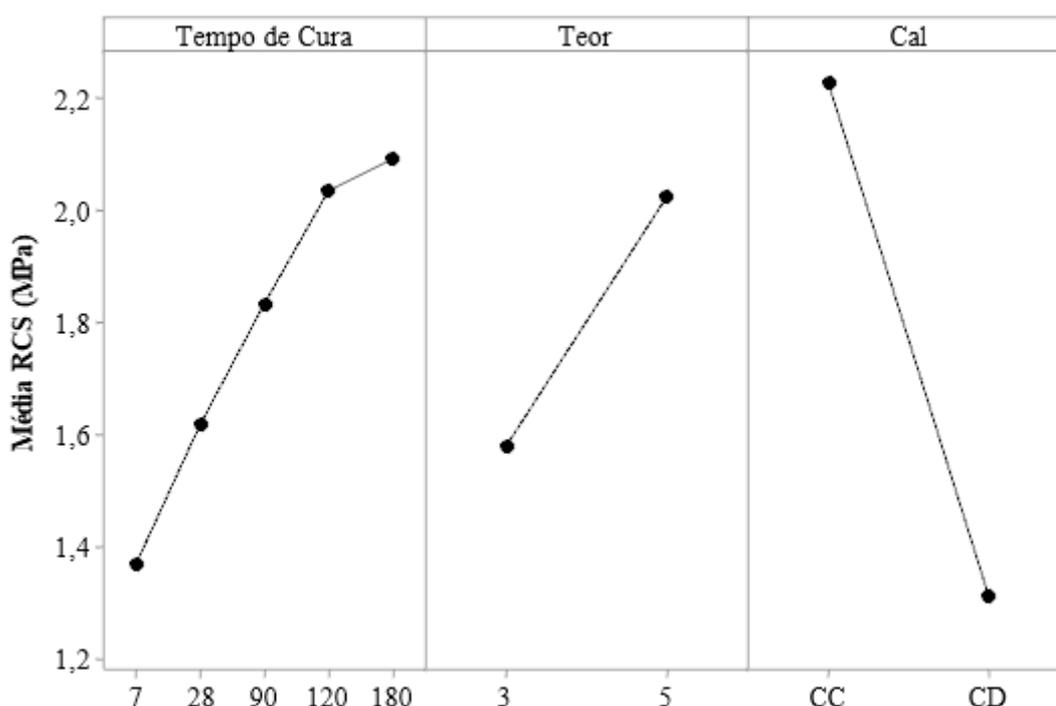


Por meio da Figura 28 pode-se verificar que há um progressivo aumento da RCS em relação ao tempo de cura para as misturas de solo com cal calcária (CC), com os teores baixo e alto

(3 e 5%). Entretanto, nas misturas de solo com cal dolomítica (CD), para ambos os teores, verifica-se que os valores de RCS não aumentaram com o aumento do tempo de cura.

Com o intuito de melhor compreender os efeitos entre o tipo de cal, teor utilizado e tempo de cura, foram realizadas análises com o auxílio do *software* Minitab 19. A Figura 29 apresenta os efeitos principais das variáveis independentes (tempo de cura, teor empregado e tipo de cal – em relação à variável resposta (resistência à compressão simples).

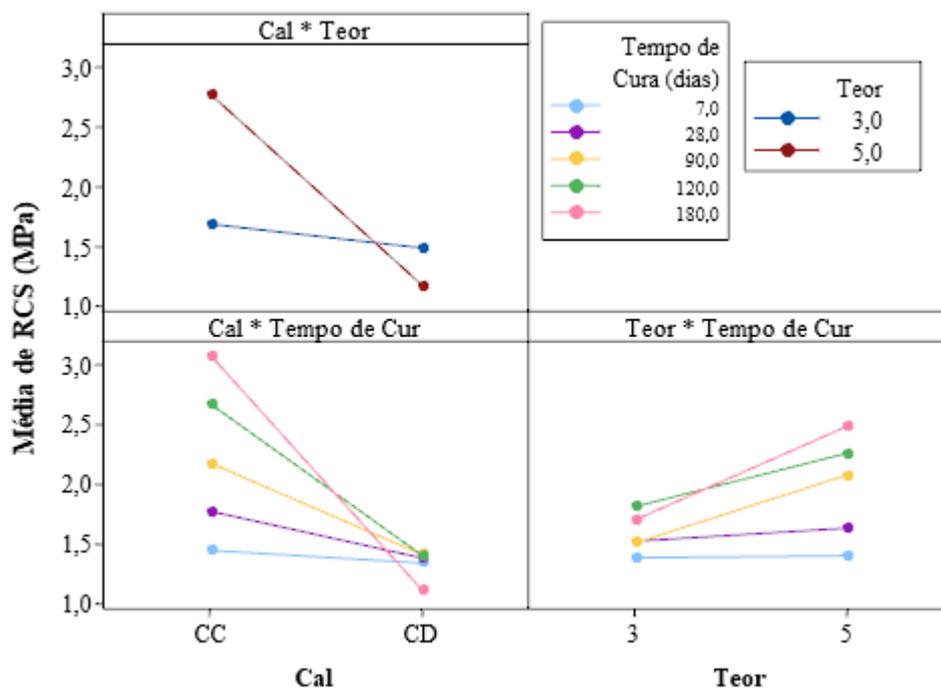
Figura 29: Gráfico dos efeitos principais para a RCS das misturas solo-cal



De acordo com o gráfico de efeitos principais, observa-se que o aumento na variável “tempo de cura” reflete na variável resposta RCS, de forma que, quanto maior o tempo de cura, maior será o valor de RCS. Nesse mesmo sentido, a variável “teor” apresenta valores de RCS mais elevados quando se aumenta o teor de baixo para alto, ou seja, de 3 para 5%. Por fim, a variável tipo de cal, apresenta maiores valores na variável resposta, RCS, quando se emprega a calcítica ao invés de dolomítica.

Com o intuito de observar as interações de segunda ordem entre os efeitos principais na variável resposta (RCS) apresenta-se a Figura 30.

Figura 30: Gráfico de interações para a RCS de misturas solo-cal



Para análise das interações, observa-se a existência de intersecção entre as retas e, em caso positivo, há interação. Ainda, quanto mais paralelas as retas estiverem entre si, menor é a interação entre elas. Dessa forma, nota-se interação entre tipo de cal *versus* teor, e tipo de cal *versus* tempo de cura.

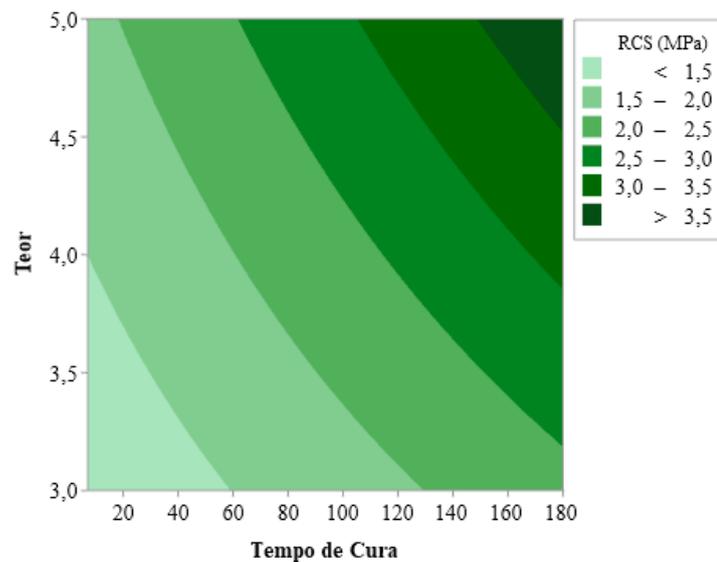
Conforme o gráfico de interações apresentado, pode-se verificar que a interação tipo de cal *versus* teor impacta de diferentes formas a variável resposta. Sendo que, no caso da cal calcítica, a diferença entre os teores baixo e alto (3 e 5%) é mais pronunciado na variável resposta. Isso pode ser melhor visualizado quando se analisa separadamente a linha referente ao teor alto (5%) que sofre uma brusca queda partindo da cal calcítica (CC) para a dolomítica (CD).

Em relação a interação tipo de cal *versus* tempo de cura, nota-se que a cal calcítica (CC) causa um aumento gradativo na resposta RCS em decorrência do aumento do tempo de cura, o que não ocorre para a cal dolomítica (CD), que chega a apresentar redução nos valores da variável resposta no tempo de cura mais prolongado

Por fim, a interação entre as variáveis teor *versus* tempo de cura apresenta um gradativo aumento nos valores da variável resposta (RCS) quando aumentados os tempos de cura. Isso também é refletido no aumento do teor empregado, quando altera-se de baixo para alto.

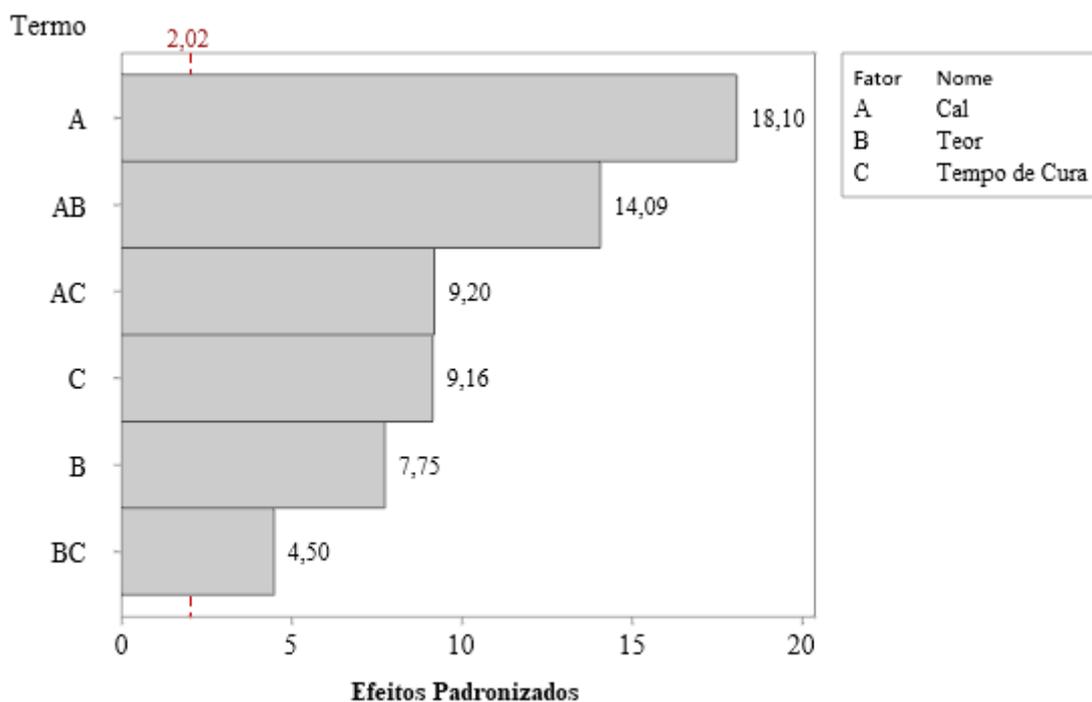
Considerando que as misturas com cal dolomítica foram pouco sensíveis aos efeitos estudados, dessa forma, a Figura 31 apresenta o gráfico de contorno para visualização dos efeitos referente à mistura com cal calcítica, possibilitando também a previsão da RCS para diferentes tempos de cura e teores de cal.

Figura 31: Gráfico de contorno de RCS *versus* cura e teor para misturas com CC



Para identificar os efeitos e as interações significativas, realizou-se uma análise de regressão múltipla que teve um coeficiente de determinação (R^2) de 94,58%. Em suma, a Figura 32 apresenta o Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados das misturas estudadas para fins de análise da magnitude e importância dos efeitos principais e suas interações. A linha em vermelho é a referência para significância ou não a nível 0,05 dos termos testados para o modelo.

Figura 32: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a RCS de misturas solo-cal



Com base no Gráfico de Pareto, observa-se que a variável com maior nível de significância é o tipo de cal, seguida por: interação entre as variáveis tipo de cal *versus* teor, interação entre as variáveis tipo de cal *versus* tempo de cura, variável tempo de cura, variável teor, interação entre as variáveis teor *versus* tempo de cura.

Por fim, as Equações 20 e 21 apresentam modelos para estimativa da RCS das misturas de solo com cal calcítica e dolomítica, respectivamente, dentro dos intervalos considerados no estudo.

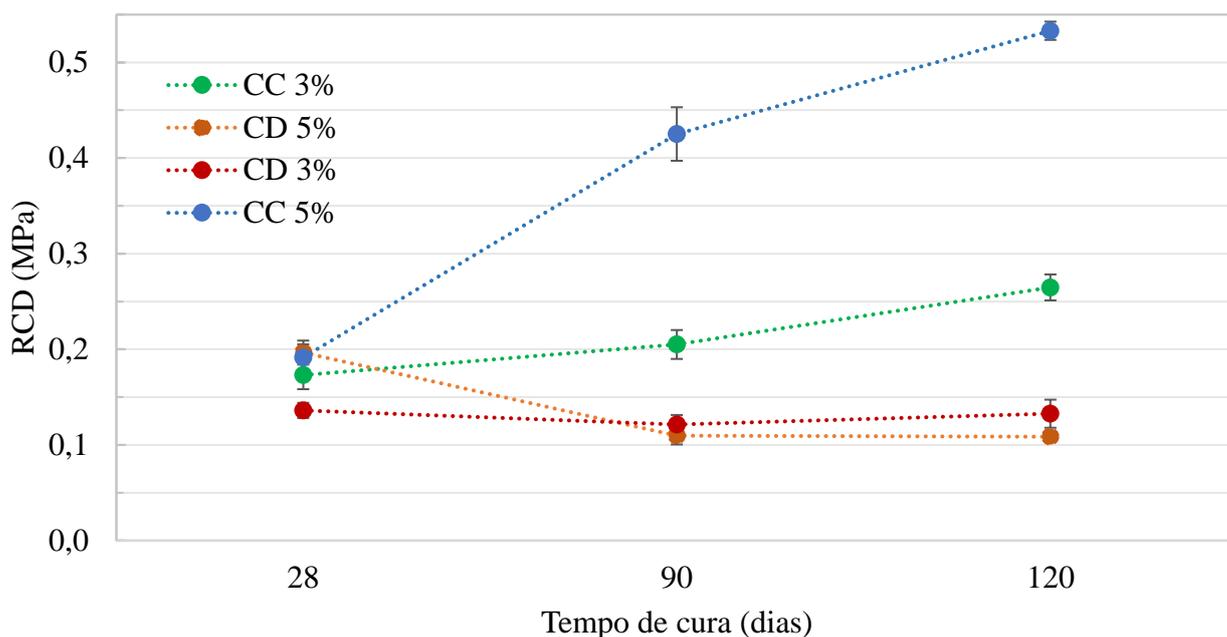
$$CC \text{ RCS} = 0,0009 + 0,00055Cura + 0,3570Teor + 0,002192Cura * Teor \quad (30)$$

$$CD \text{ RCS} = 2,834 - 0,00995Cura - 0,3521Teor + 0,002192Cura * Teor \quad (31)$$

4.4.2 Resistência à tração por compressão diametral (RCD)

Os resultados referentes à média das resistências à tração por compressão diametral (RCD) para cada mistura estudada são apresentados na Figura 33. Os desvios padrão de cada triplicata estão representados por meio de barras de erros.

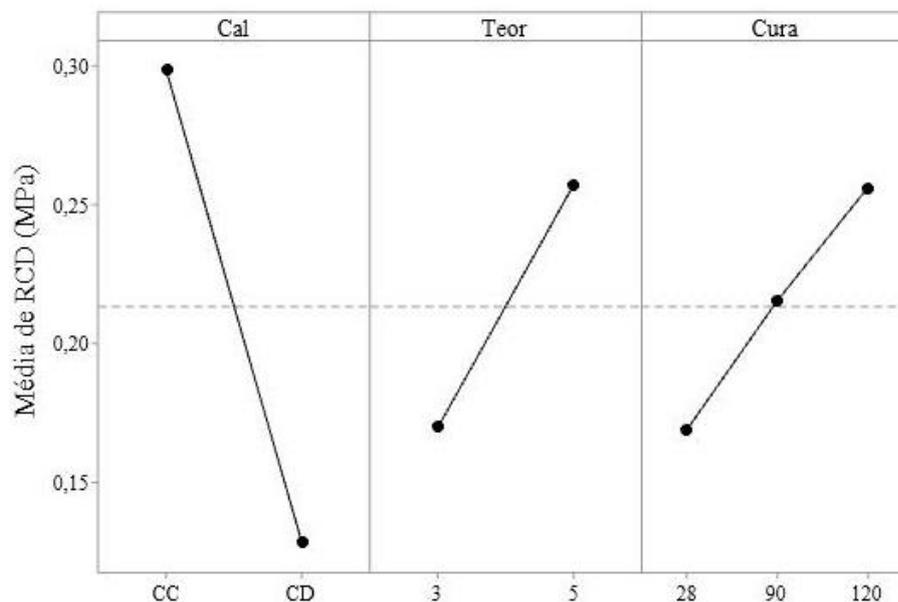
Figura 33: RCD das misturas solo-cal em função do tempo de cura



Observa-se que a adição da cal calcítica resultou no aumento da RCD com o avanço no tempo de cura, sendo esse mais acentuado para o teor de 5%. Para a adição de 3% de cal dolomítica, não foi constatado aumento na resistência da mistura com o aumento no tempo de cura. Na adição de 5% de cal dolomítica, notou-se diminuição nos valores de RCD a partir de 28 dias.

A Figura 34 apresenta os efeitos principais tipo de cal, teor empregado e tempo de cura – em relação à variável resposta (resistência à tração por compressão diametral).

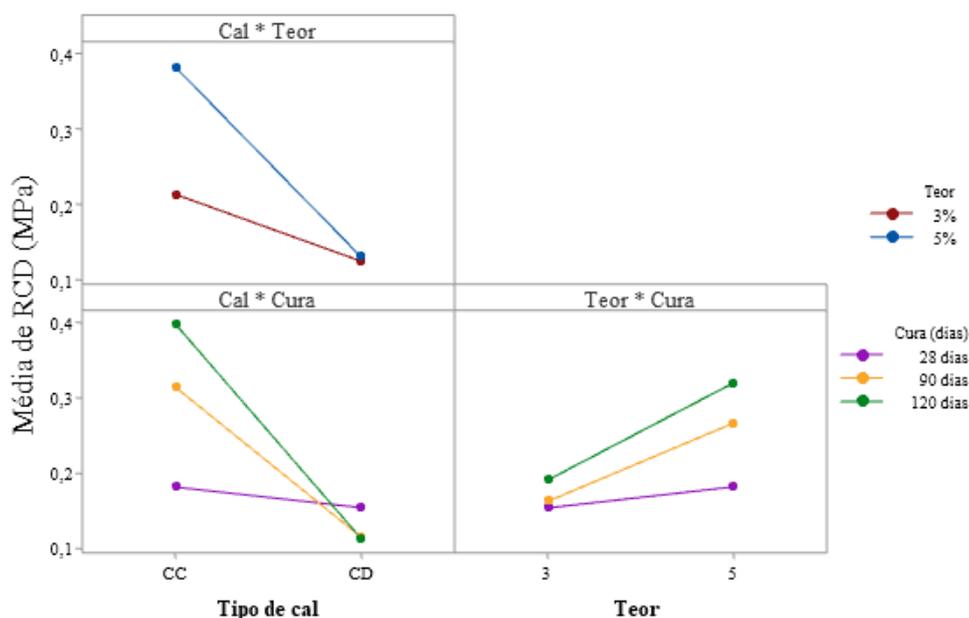
Figura 34: Gráfico dos efeitos principais para a RCD das misturas solo-cal



Em relação ao tipo de cal, observou-se que a cal calcítica conferiu às misturas maior resistência do que a cal dolomítica. Quanto aos teores empregados, notou-se que o teor de 5% conferiu maior ganho de resistência em relação ao teor de 3%, entretanto, esse efeito mostrou-se menos significativo que o tipo de cal. Relativo aos três tempos de cura estudados (28, 90 e 120 dias), verificou-se o incremento nas médias da variável resposta em concordância com o aumento no tempo de cura.

Com o intuito de observar as interações de segunda ordem entre os efeitos principais na variável resposta (RCD) apresenta-se a Figura 35.

Figura 35: Gráfico de interações para a RCD das misturas solo-cal

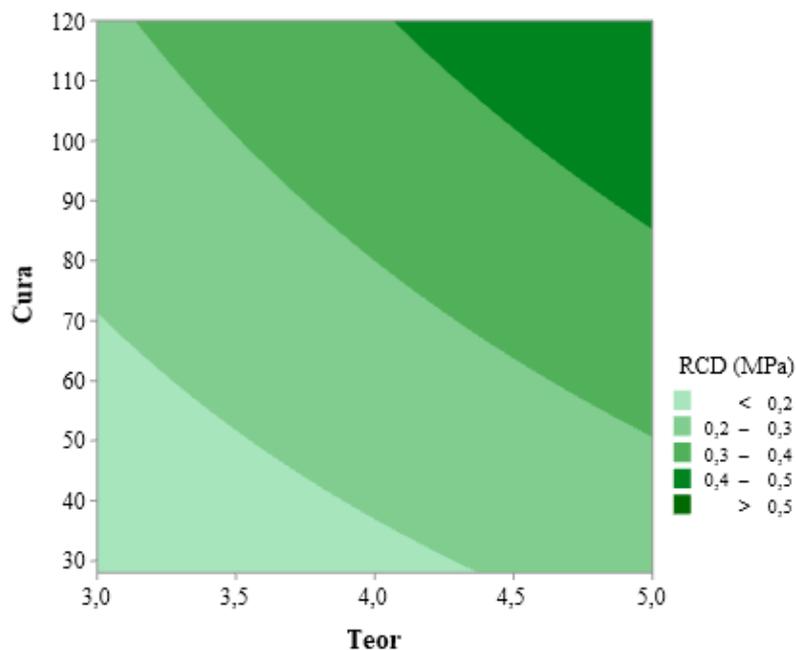


Nota-se que a interação com maior efeito sobre a variável de resposta (RCD) é o tipo de cal *versus* tempo de cura, seguida por: tipo de cal *versus* teor, e teor *versus* tempo de cura. Ainda, conforme a Figura 35, é possível observar no gráfico da interação tipo de cal *versus* teor que, a cal dolomítica obteve resistências substancialmente inferiores àquelas obtidas para a cal calcítica e, ainda, que o teor de 5% resultou em maiores resistências em relação ao teor de 3% no caso da cal calcítica, não resultando em ganhos de resistência para a cal dolomítica.

No gráfico da interação do tipo de cal *versus* tempo de cura, o efeito do tempo de cura nas misturas com cal calcítica na variável resposta pode ser facilmente visualizado, considerando o incremento na resistência dos 28 aos 120 dias. Já para as misturas de cal dolomítica, observa-se a redução na resistência a partir dos 28 dias.

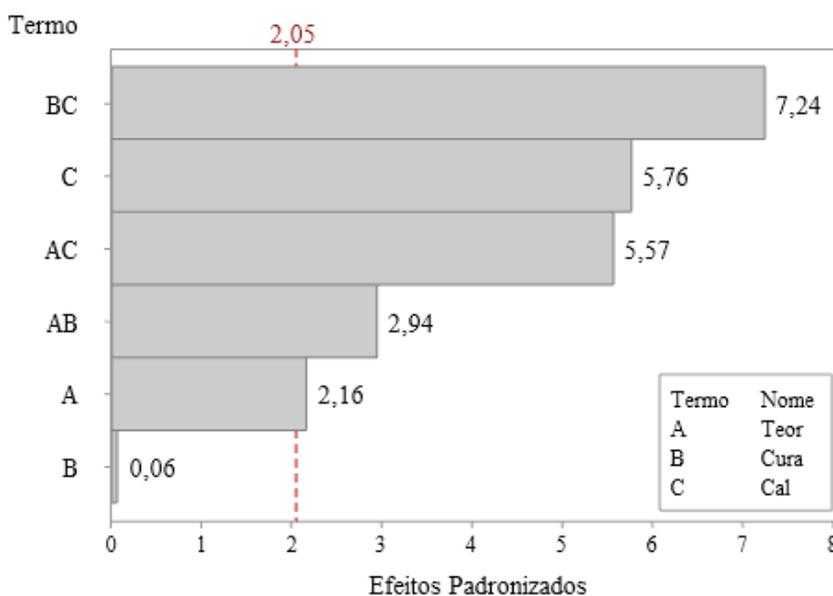
Considerando que as misturas com cal dolomítica foram pouco sensíveis aos efeitos estudados, a Figura 36 apresenta o gráfico de contorno para visualização desses efeitos referente à mistura da cal calcítica, possibilitando também a previsão da RCD para diferentes tempos de cura e teores de cal. Nota-se a partir desse, que à medida que o tempo de cura e o teor de cal calcítica empregada são aumentados, a resistência à tração por compressão diametral das amostras também é aumentada.

Figura 36: Gráfico de Contorno de RCD *versus* cura e teor para misturas com CC



A Figura 37 apresenta o Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados das misturas estudadas para fins de análise da magnitude e importância dos efeitos principais e suas interações, na regressão múltipla realizada, o coeficiente de regressão (R^2) obtido foi de 91,69%. A linha em vermelho é a referência para significância ou não a nível 0,05 dos termos testados para o modelo.

Figura 37: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a RCD das misturas solo-cal



Nota-se que o termo B, equivalente ao efeito tempo de cura, quando analisado isoladamente, não tem significância quando comparado aos outros termos. Já o termo BC – tempo de cura *versus* tipo de cal, corresponde às variáveis com maior efeito/significância na RCD. Sequencialmente, o termo BC é seguido pelos termos: C (tipo de cal), AC (teor empregado e tipo de cal), AB (teor empregado e tempo de cura) e A (teor empregado).

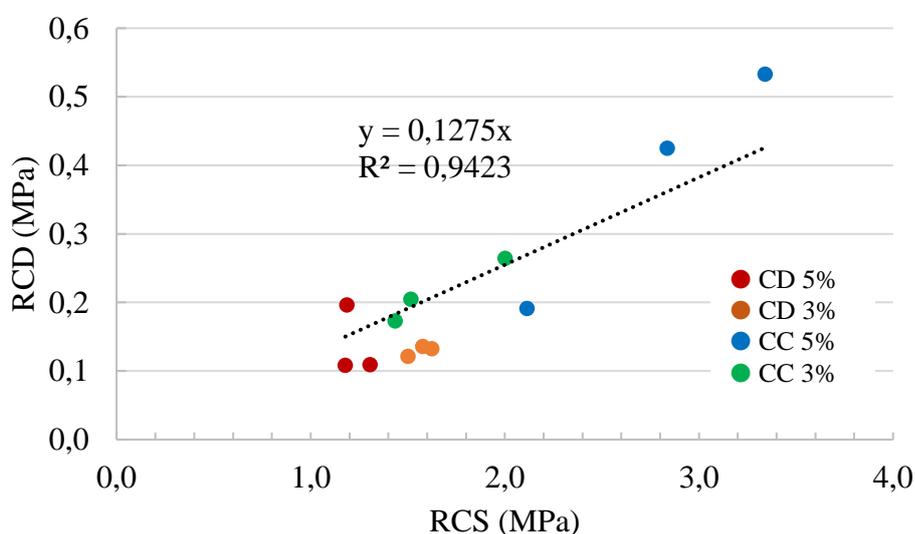
As Equações 32 e 33 apresentam modelos para estimativa da RCD das misturas de cal calcítica e dolomítica, respectivamente, dentro dos intervalos considerados no estudo.

$$\text{CC RCD} = -0,0433 + 0,0394 \text{ Teor} + 0,000051\text{Cura} + 0,000568 \text{ Teor} * \text{Cura} \quad (32)$$

$$\text{CD RCD} = 0,3340 - 0,0420 \text{ Teor} - 0,002760\text{Cura} + 0,000568 \text{ Teor} * \text{Cura} \quad (33)$$

Por fim, a Figura 38 apresenta o modelo para estimativa da RCD por meio da RCS com base nas médias obtidas e considerando-se todas as misturas. A partir dessa relação verificou-se que a RCD corresponde a aproximadamente 13% de RCS.

Figura 38: Relação entre RCD e RCS para as misturas solo-cal



Outra linha de tendência foi gerada considerando o modelo de previsão linear sem intercepto, obtendo-se um R^2 de 0,87.

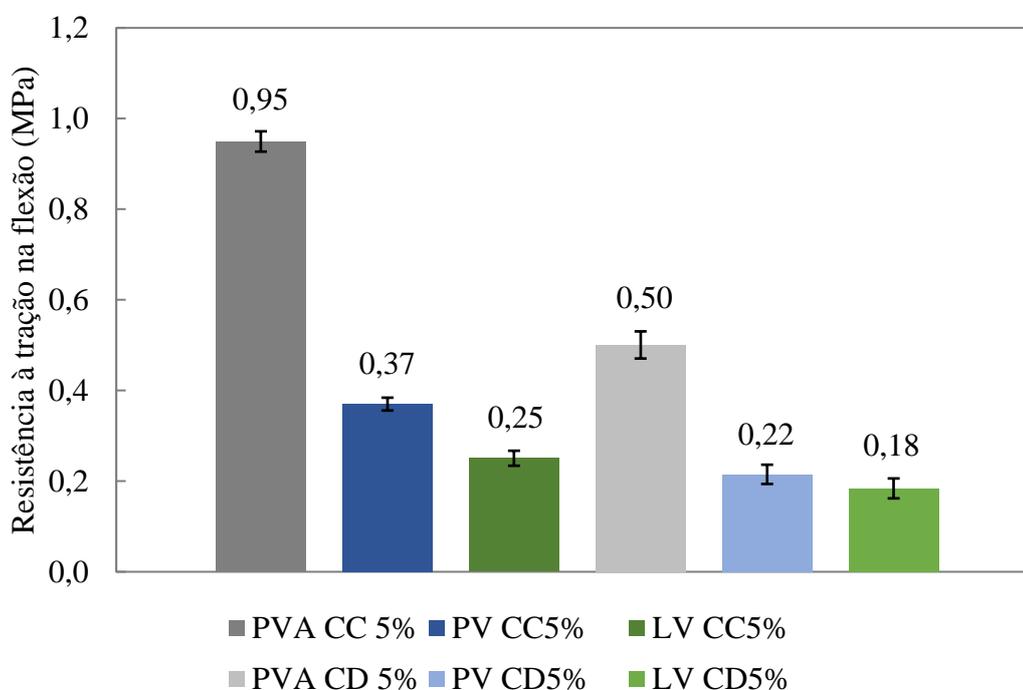
4.4.3 Resistência à Tração na Flexão (RTF)

Os ensaios de resistência à tração na flexão foram realizados em triplicata com as misturas de solo com 5% de calcítica e dolomítica, considerando o tempo de cura de 28 dias. Também foram determinados o módulo de elasticidade na flexão e deformação na ruptura, ambos parâmetros utilizados no dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos.

Os resultados obtidos para o argissolo utilizado nessa pesquisa foram comparados com os resultados obtidos para as misturas de Kleinert (2021), também compactadas na energia modificada, utilizando os teores de 5% de cal calcítica e dolomítica. Dessa forma, o argissolo vermelho utilizado nessa pesquisa foi denominado como sendo PV. Já os solos utilizados por Kleinert (2021) foram denominados como: argissolo vermelho amarelo como PVA e latossolo como LV.

A Figura 39 mostra as médias referentes aos resultados das resistências à tração na flexão com seus respectivos desvios padrão.

Figura 39: Comparativo dos resultados de RTF das misturas solo-cal



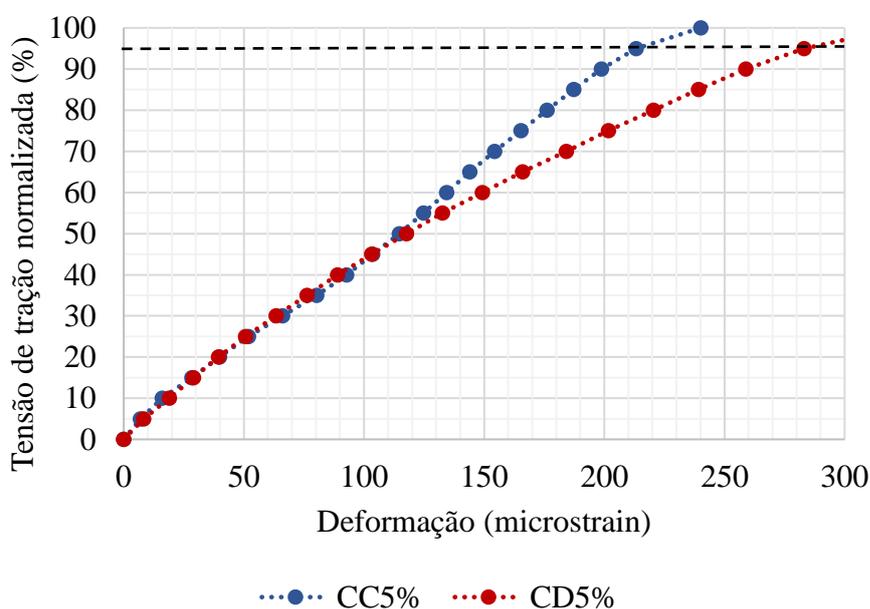
Nota-se que a utilização da cal dolomítica em relação à calcítica reduziu todos os valores de RTF. Dessa forma, ainda que o emprego das cales nas mesmas condições ocasione diferentes

efeitos nos argissolos estudados, observa-se que o argissolo vermelho amarelo (PVA) teve resultados de RTF consideravelmente superiores ao argissolo vermelho (PV), tanto para a cal calcítica quanto para a dolomítica.

Ressalta-se que o PVA foi classificado por Kleinert (2021) como sendo um NS' (conforme a metodologia MCT) e A-7-5 (AASHTO), já o PV, foi classificado na presente pesquisa como sendo um LG' (conforme a metodologia MCT) e A-7-6 (AASHTO). Mesmo que ambos argissolos sejam classificados como tal, o argissolo vermelho (PV) teve um comportamento à tração na flexão muito mais próximo ao do latossolo (LV) nas mesmas condições de adição.

A Figura 40 apresenta as tensões de tração normalizadas (%) *versus* deformações associadas a tais tensões. Foi traçada uma curva média das amostras ensaiadas para cada mistura, combinando os dados de tensão e deformação.

Figura 40: Curvas tensão de tração normalizada por deformação para as misturas de Argissolo com cal

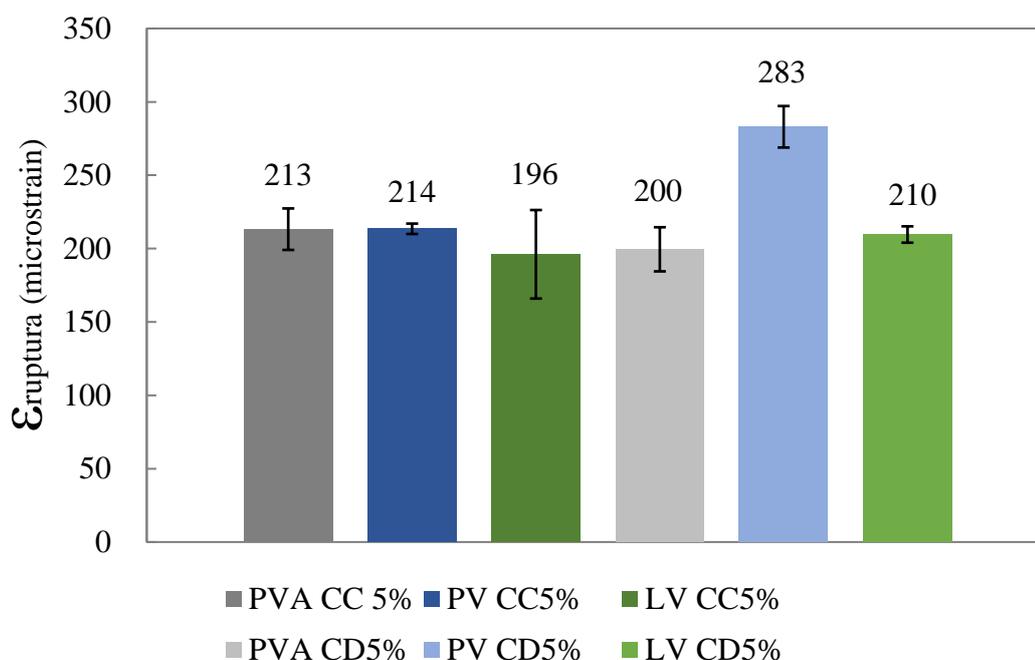


Considerando que a deformação na ruptura corresponde a 95% da tensão de tração, observa-se que a mistura CD5% tem deformação superior à mistura CC5%. Logo, as misturas tratadas com cal calcítica apresentaram menor flexibilidade.

A Figura 41 mostra os valores de deformação na ruptura das misturas estudadas em comparação com as estudadas por Kleinert (2021). Conforme já mencionado, as misturas

PVA, PV e LV equivalem ao argissolo vermelho amarelo, argissolo vermelho e latossolo, respectivamente.

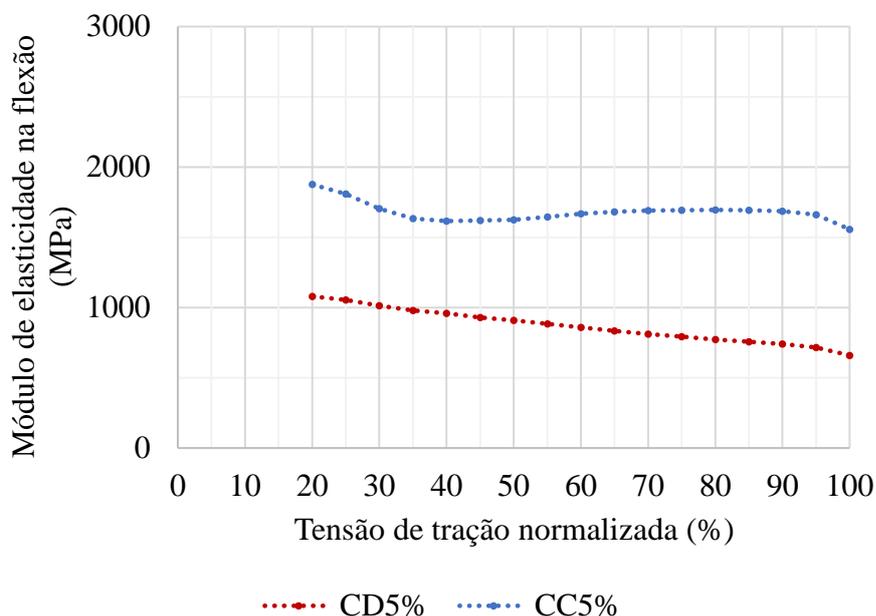
Figura 41: Comparativo da deformação na ruptura das misturas solo-cal



Nota-se que a mistura PV CD5% apresentou deformação na ruptura consideravelmente superior às apresentadas pelas outras misturas. Além disso, analisando o efeito do tipo de cal nos diferentes solos, percebe-se que o único que apresentou diferença representativa na deformação na ruptura foi o PV (argissolo vermelho), que variou de 214 *microstrain* na mistura com cal calcítica para 283 *microstrain* na mistura com cal dolomítica.

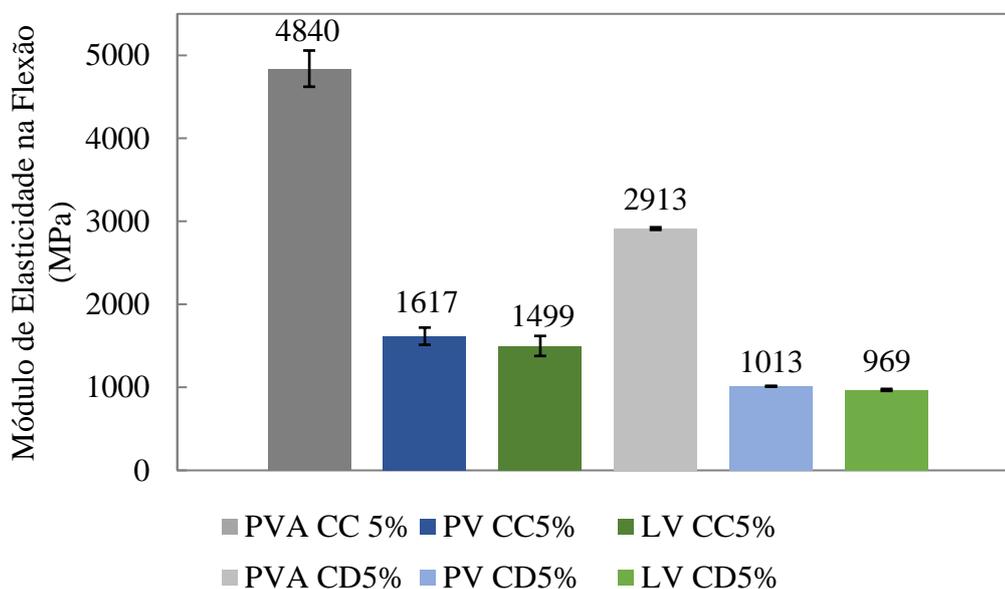
A variação do módulo de elasticidade na flexão com o acréscimo de tensão aplicado durante o ensaio é apresentada na Figura 42.

Figura 42: Variação do módulo de elasticidade na flexão com o acréscimo de tensão durante o ensaio



A Figura 43 apresenta os módulos de elasticidade na flexão (MEF) correspondente a 40% da RTF das misturas desta pesquisa e de Kleinert (2021). A partir dela, é possível constatar a influência do tipo de cal no MEF. Para os três solos, a cal calcítica tornou as misturas mais rígidas, proporcionando maiores valores de MEF quando comparada à cal dolomítica.

Figura 43: Comparativo do módulo de elasticidade na flexão das misturas solo-cal



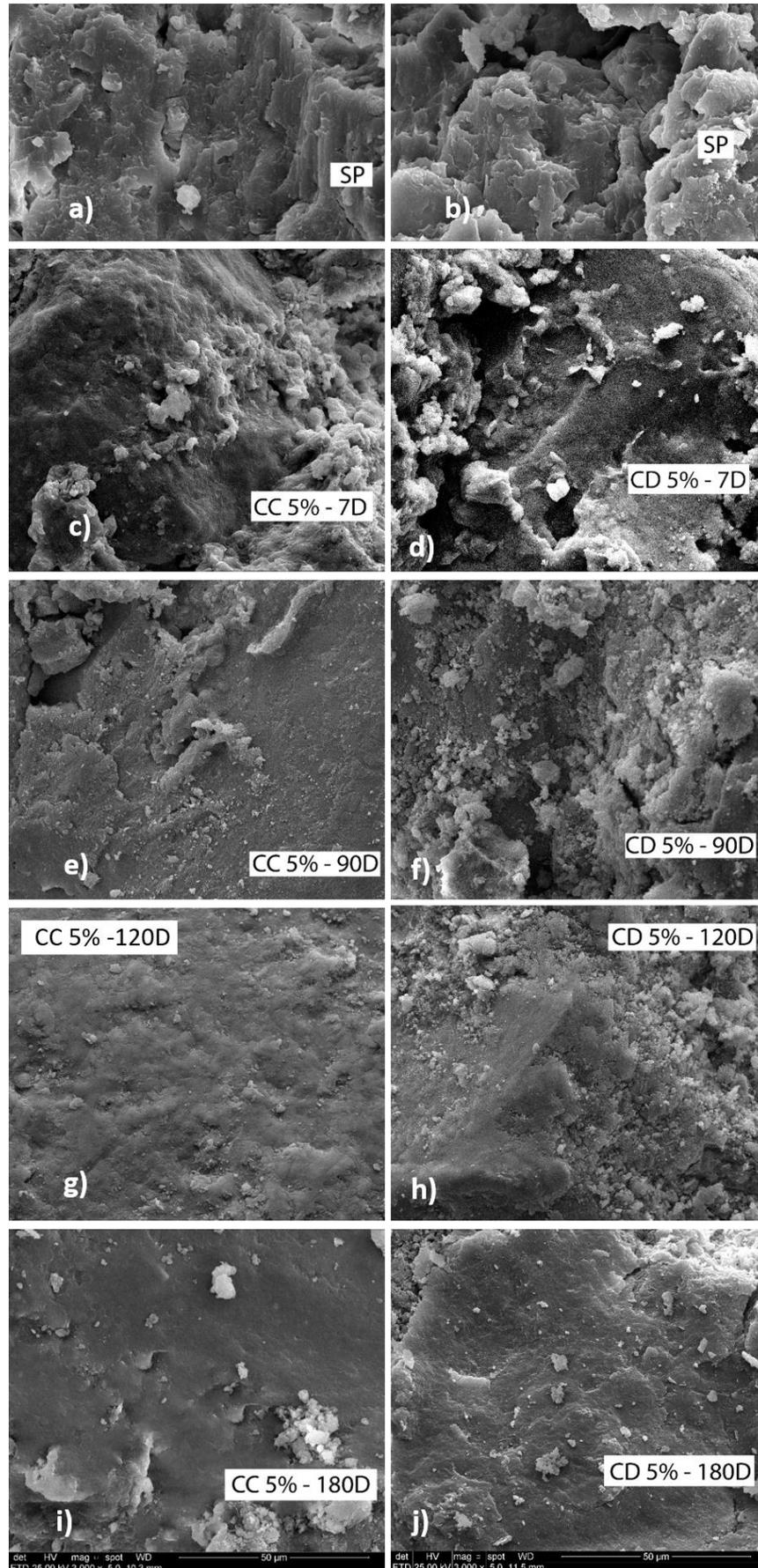
4.5 ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DAS REAÇÕES CIMENTANTES

Os próximos subcapítulos concentram-se na avaliação das reações cimentantes em diferentes tempos de cura por meio da análise da microestrutura e mineralogia.

4.5.1 Análises MEV

Na são apresentadas imagens da Figura 44 com ampliação de 3000x, contemplando o solo puro e as misturas de solo e cal nos tempos de cura de 7, 90, 120 e 180 dias. Essas imagens ajudam a avaliar a mudança textural das duas misturas à nível microscópico. Conforme as imagens a e b, na matriz interagregados, o solo apresentou muitos poros e maior rugosidade. Isso é alterado com a adição de cal, conforme pode ser visualizado nas imagens “c” e “d” da Figura 44.

Figura 44: Análises MEV com ampliação de 3000x para o solo e as misturas aos 7, 90 e 120 dias de cura



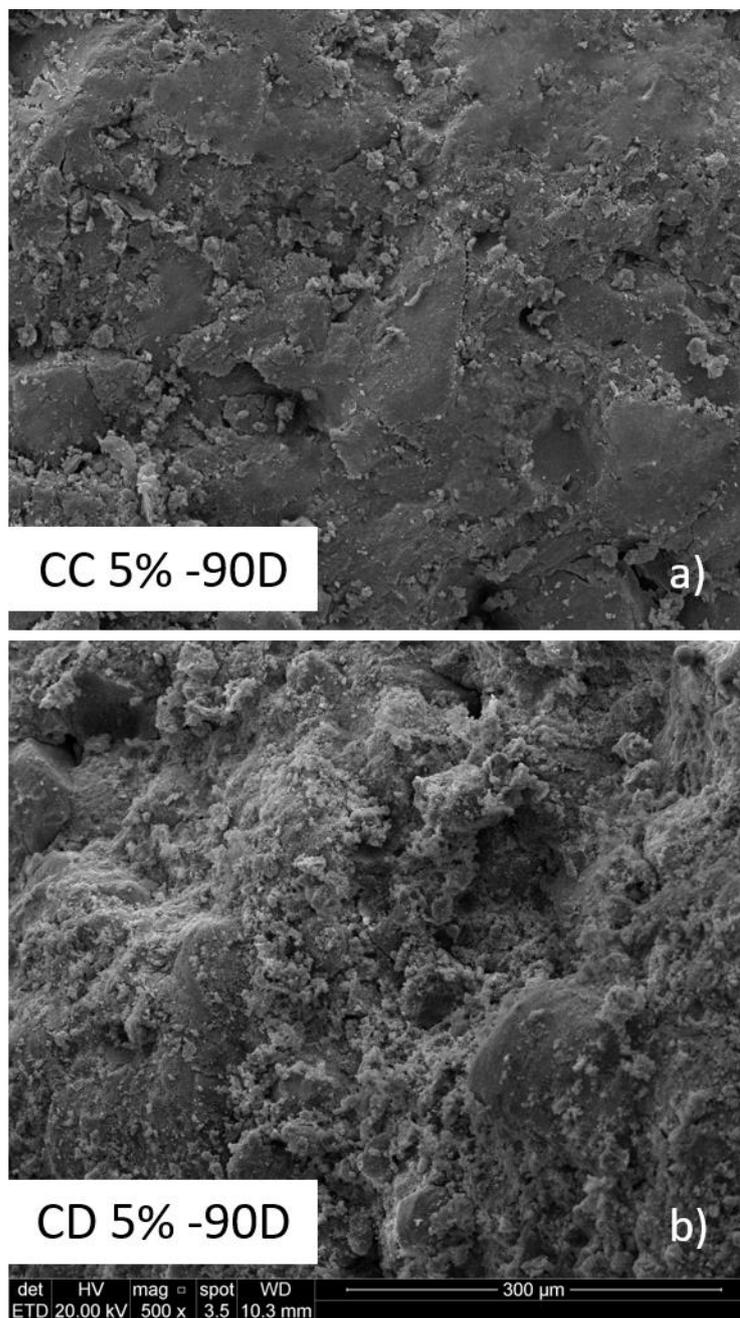
As misturas de solo com cal calcítica e dolomítica apresentaram já aos sete dias uma matriz mais fechada do que o solo puro. Com base nas imagens MEV, foi possível constatar várias floculações dispersas em uma matriz mais densa ao fundo, tanto na imagem “c” quanto na “e”. Di Sante *et al.* (2014) também observaram as mesmas floculações em análises MEV em 24 horas após a mistura, sendo essas identificadas como produtos oriundos das reações primárias da mistura solo-cal na forma de flocos revestidos de gel. Silva (2016), Medeiros (2017) e Jha e Silvapullaiah (2020) também observaram essa alteração no tamanho das partículas em floculações aos 7 dias de cura, ambos autores atribuíram esse comportamento como sendo um sinal da fase inicial das reações pozolânicas.

No tempo de cura de 90 dias, as floculações desapareceram, mostrando um aspecto mais denso nas duas misturas, tanto com cal calcítica quanto com dolomítica. Todavia, na mistura com cal dolomítica essas floculações/agregações deram espaço a um aspecto de pó disperso sobre a matriz mais fechada, o que pode ser visualizado nas imagens “e” e “f”, da Figura 44. Com o aumento do tempo de cura, conforme comentado por Arabi e Wild (1986), as partículas de solo vão formando pontes de intertravamento de partículas em forma lamelar, formando uma rede contínua.

Para os tempos de cura seguintes, 120 e 180 dias, conforme pode ser visualizado nas imagens “g” a “j” da Figura 44, as estruturas referentes às misturas com cal calcítica parecem mais intertravadas de uma forma geral. Observando os “pontos de cimentação” das misturas com cal dolomítica, mesmo em tempos de cura mais avançados, as partículas não parecem totalmente interligadas umas às outras, tendo um aspecto de folhas sobrepostas (imagens “h” e “j”), indício de uma cimentação fraca. Essa zonas com produtos de reação detectáveis nas análises MEV também foram identificados por Di Sante *et al.* (2014), que concluíram que as reações solo-cal não desenvolvem-se uniformemente em toda a amostra. Os autores indicaram que isso possivelmente ocorre devido às misturas não terem um nível de saturação de 100%, tendo poros parcialmente cheios de água, causando a não uniformidade na distribuição dos produtos cimentantes.

A Figura 45 apresenta um comparativo em menor resolução (magnitude de 500x) entre as duas misturas aos 90 dias. Nela, é possível notar na imagem da mistura com cal dolomítica (imagem b), o aspecto característico de todas essas misturas na realização das análises MEV, isto é, a existência de um filler disperso na matriz, o que pode estar atrelado ao grande percentual de impurezas (hidróxido de magnésio) contido no aditivo.

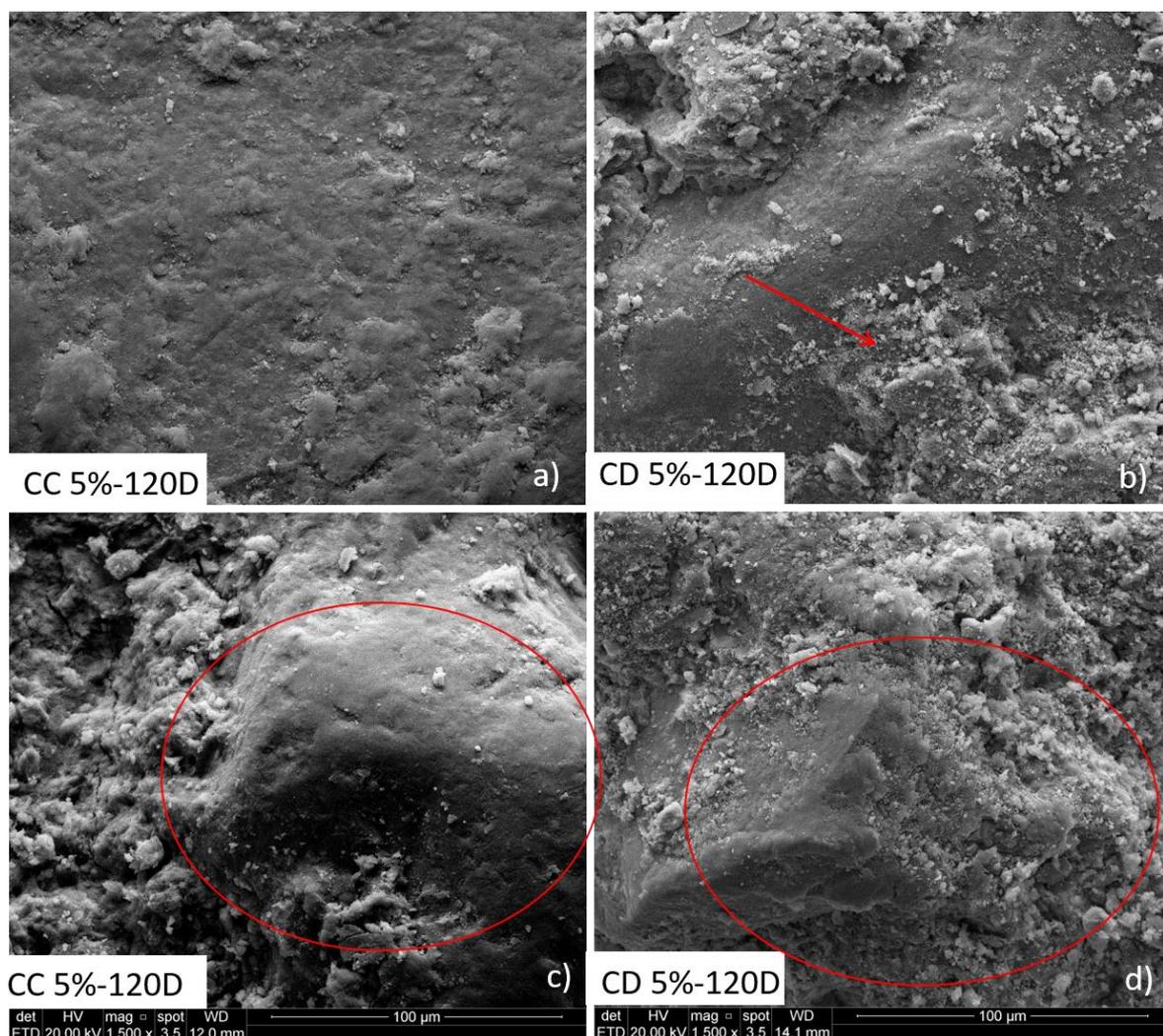
Figura 45: Análises MEV com ampliação de 500x para as misturas CC 5% e CD 5% com 90 dias de cura



Em todos os tempos de cura, foram visualizados, para ambas as misturas, o que parecem ser pontos de cimentação onde a matriz visivelmente parece mais fechada (círculos em vermelho das imagens “c” e “d”, da Figura 46). O aspecto de fíler se manteve nas imagens das misturas com cal dolomítica (seta imagem b) e as misturas com cal calcítica continuaram apresentando uma matriz visivelmente mais densa. Ainda, conforme a Figura 46, pode ser observado que a maioria dos pontos de cimentação das misturas com cal dolomítica tem um aspecto frágil com

esse fíler compondo a matriz e contribuindo para a percepção de um aspecto visivelmente mais poroso, quando comparado com as misturas com cal calcítica.

Figura 46: Análise MEV com ampliação de 1500x para as misturas CC 5% e CD 5% com 120 dias de cura



A densificação da matriz para tempos de cura mais longos também foi constatada por Arabi e Wild (1986). Por meio de análises MEV, Vitale *et al.* (2017) constataram que para um solo caulínítico tratado com cal a curto prazo não foram observadas evidências de novas fases hidratadas. Todavia, após um tempo de cura mais longo (270 dias), foi observada a presença de C-A-H nas partículas de argila.

Aos 180 dias de cura foram realizadas análises de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) contemplando dois pontos característicos de cimentação em ambas as misturas com as duas cales, mais dois pontos no solo puro. Para essa análise, foram realizadas ampliações de

magnitude de 5000x. A Figura 47 apresenta uma, das duas análises EDS realizadas para cada uma das misturas e do solo puro. Para fins comparativos, foi calculada a média das porcentagens referentes aos elementos encontrados nos dois pontos. A média dessas análises é apresentada na Tabela 16. Salienta-se que os elementos que apresentaram somente “traço”, ou seja, porcentagem menor que 1% em massa, foram descartados na análise, assim como o elemento oxigênio (O).

Figura 47: Imagens MEV utilizadas para a análise EDS com ampliação de 5000x

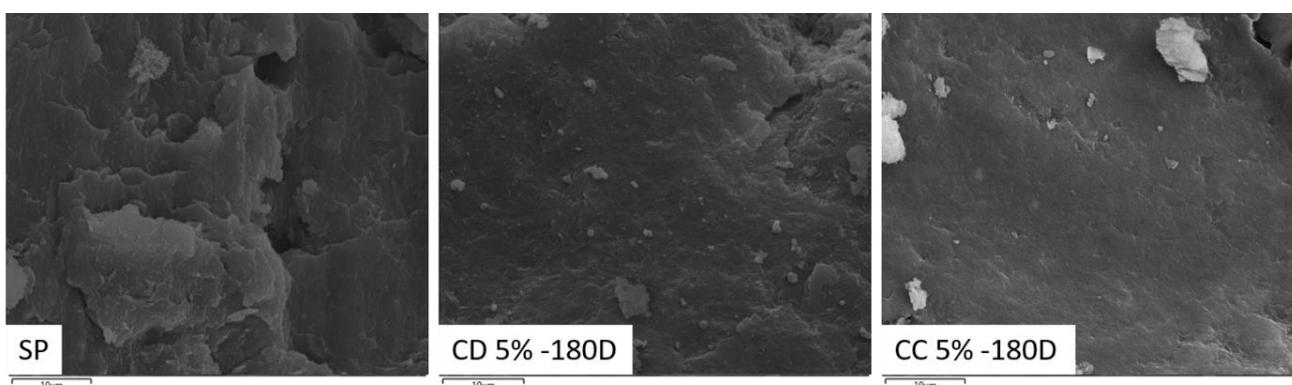


Tabela 16: Média das análises EDS por área

Elemento (%)	SP	CC 5%	CD 5%
Al	18,22	10,20	17,26
Si	27,70	42,28	25,59
Fe	8,26	5,46	16,81
Ca	-	2,55	3,40
Mg	-		3,93
K	-		1,09

O solo puro apresentou um teor de 18,22% de alumínio, teor que diminuiu consideravelmente para a mistura CC 5% com 180 dias de cura (10,20%). Essa queda é justificável pois o alumínio apresentou-se como tendo alta capacidade de troca, conforme constatado na análise química anteriormente apresentada. A porcentagem de sílica em massa também aumentou consideravelmente, de 27,70% do solo puro, para 42,28% na mistura CC 5% com 180 dias de cura, sendo um forte indício da formação de produtos cimentantes compostos por sílica.

O cálcio, oriundo do hidróxido de cálcio das cales, foi encontrado em ambas as misturas. No caso da mistura CD 5% com 180 dias de cura, o magnésio foi identificado em ambas as análises EDS, o que é compatível com o alto teor de hidróxido de magnésio encontrado na cal dolomítica. Ainda, um baixo teor de potássio (K) também foi encontrado nas regiões cimentadas características da mistura com cal dolomítica, elemento não presente nos pontos característicos da mistura com cal calcítica.

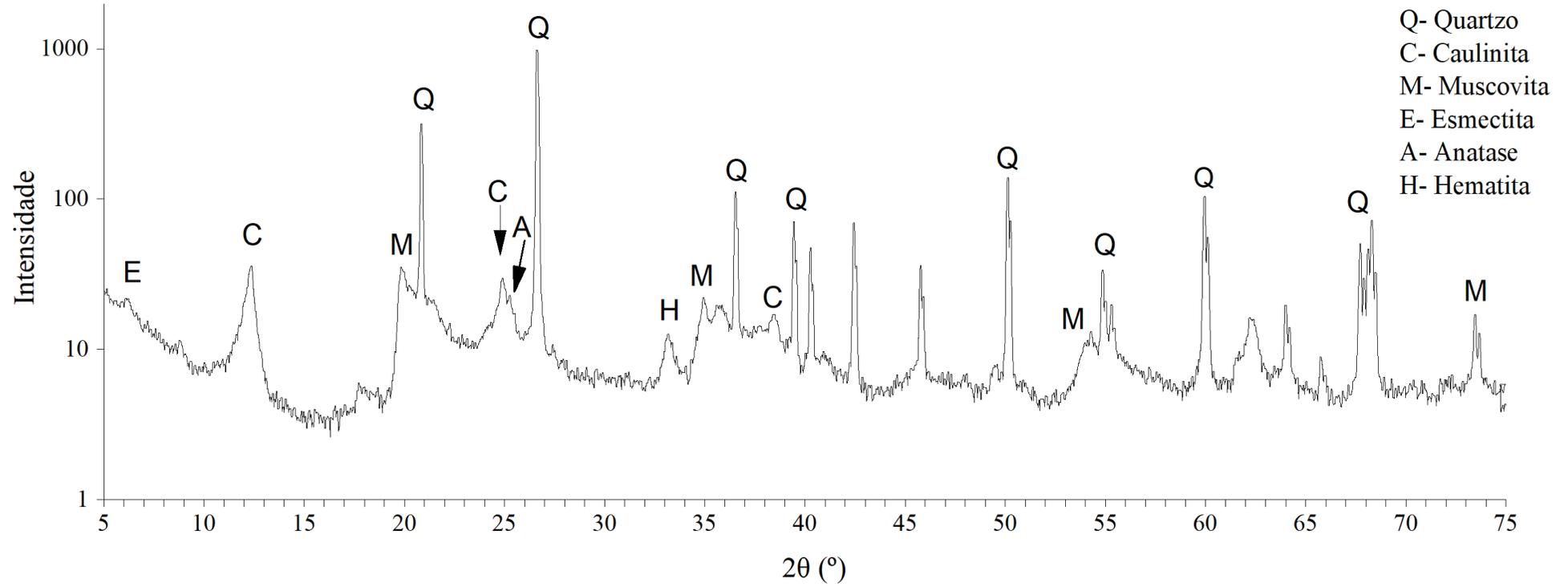
Jha e Sivapullaiah (2020) relataram matrizes desagregadas em amostras curadas por períodos mais longos (180 e 365 dias), com aspectos similares ao que seriam, no caso desse trabalho, as folhas sobrepostas da mistura com cal dolomítica já aos 90 dias. Para os autores, isso ocorre devido à ineficácia dos compostos cimentícios em períodos de cura mais longos. Diante disso, os autores verificaram a variação na concentração de íons de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ em vários tempos de cura, sendo que, para as idades de 180 e 365 dias, somente os íons de Na^+ apresentaram diminuição. Dessa forma, salienta-se que a variação nas concentrações iônicas controla as reações das misturas solo-cal, e como consequência, a alteração e formação da mineralogia e microestrutura.

A presença de potássio (K) nos EDS de área da amostra da mistura com cal dolomítica curada durante 180 dias corrobora os resultados do estudo supracitado, tendo em vista que esse elemento não aparece nos EDS de área do solo puro.

4.5.2 Análises DRX

Para realização das análises do ensaio de DRX foi utilizado o *software* Match!3, também utilizado por outros autores como Akula e Little (2020). A Figura 48 apresenta a análise DRX do argissolo empregado nesse estudo. Foram encontrados picos característicos de quartzo, caulinita, muscovita, esmectita, anatase e hematita.

Figura 48: Análise de DRX do solo puro



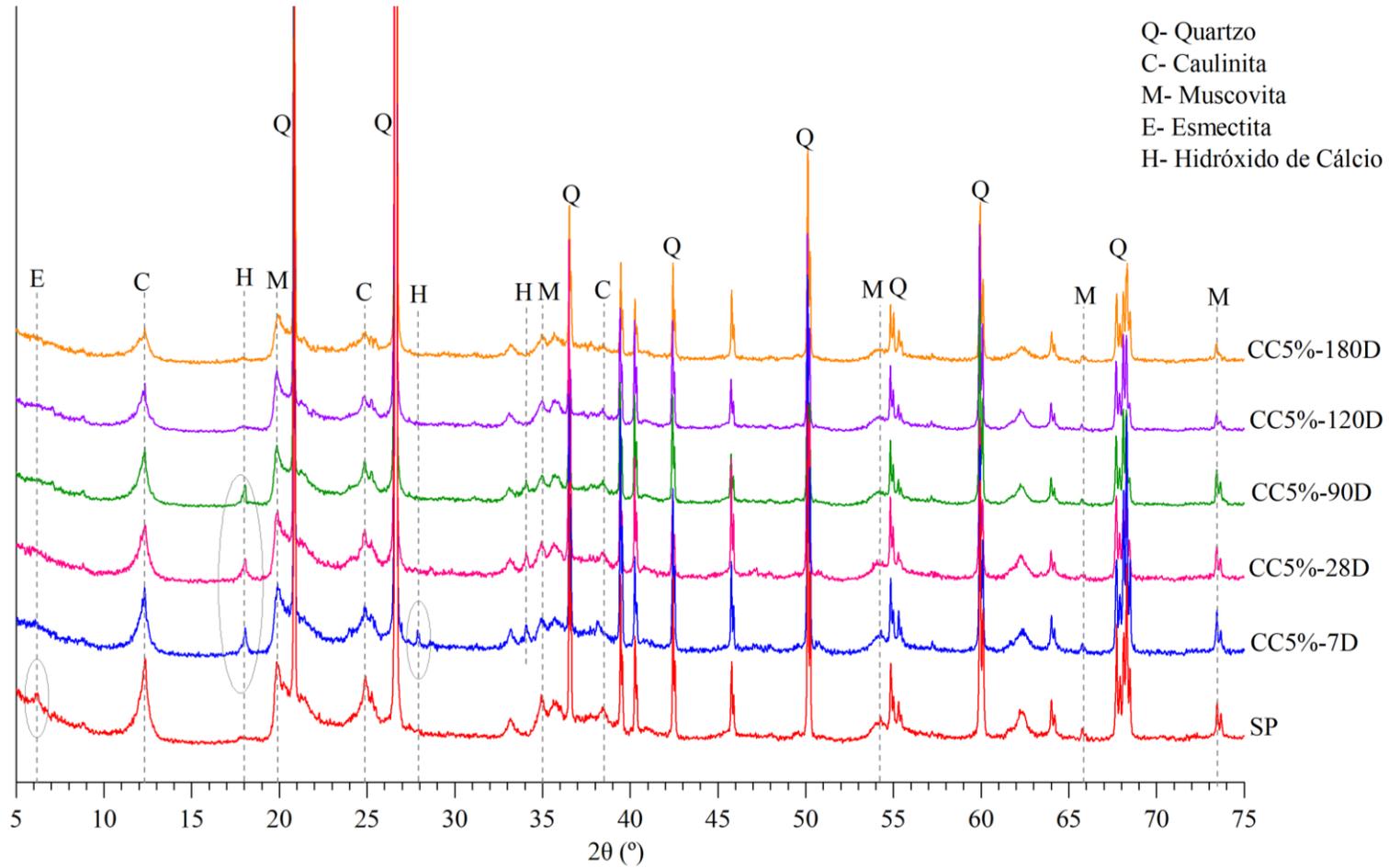
O consumo da cal e argilominerais foi investigado através de análises DRX realizadas nos mesmos tempos de cura dos ensaios de RCS. A Figura 49 possibilita a análise da redução dos picos dos argilominerais do solo puro e da mistura com cal calcítica em relação às misturas curadas em diferentes idades.

A partir dos 7 dias (em azul), primeira análise DRX com adição de cal, o pico de cal tem sua maior intensidade. Já com 90 dias de cura pode-se observar maior consumo da cal, sendo que aos 180 dias (em laranja), o pico desaparece quase que completamente, sinalizando pouca cal residual. Também podem ser observados picos de cal aos 34° de theta nos tempos de cura de 7 (em azul), 28 (em rosa) e 90 dias (em verde), completamente consumidos após 120 dias (em roxo). Um único pico relativo em 28° pode ser observado na análise aos 7 dias, sendo esse rapidamente consumido, não aparecendo nas análises dos demais tempos de cura.

A esmectita (aprox. 6°), argilomineral do tipo 2:1, foi rapidamente consumida nas reações iniciais entre a cal e o solo, não refletindo nas análises a partir dos 7 dias de cura. Akula e Little (2020) também observaram a redução de esmectita em dois diferentes solos a partir do tratamento com cal.

A caulinita, argilomineral tipo 1:1, foi sendo gradualmente consumida ao longo do tempo de cura, havendo redução da intensidade dos picos do argilomineral. O mesmo ocorreu com a muscovita, argilomineral tipo 1:1, todavia, as reduções não pareceram ser tão expressivas como as da caulinita. Redução na intensidade dos picos de quartzo também foram observadas. Conforme Akula e Little (2020), a adição de cal hidratada aumenta o pH das misturas de solo-cal, diminuindo a estabilidade da caulinita, esmectita e quartzo. Glenn e Handy (1963) também observaram redução nos picos da caulinita.

Figura 49: Análises DRX das misturas de solo e cal calcítica



Al-Mukhtar *et al.* (2010) identificaram picos não consumidos de cal hidratada aos 2θ de $18,0^\circ$, 28° e $34,1^\circ$ em análises DRX. De acordo com o apresentado pelos autores, na Figura 49 podem ser observados picos oriundos da adição de cal (H) não consumida nas misturas, aos 18° de 2θ .

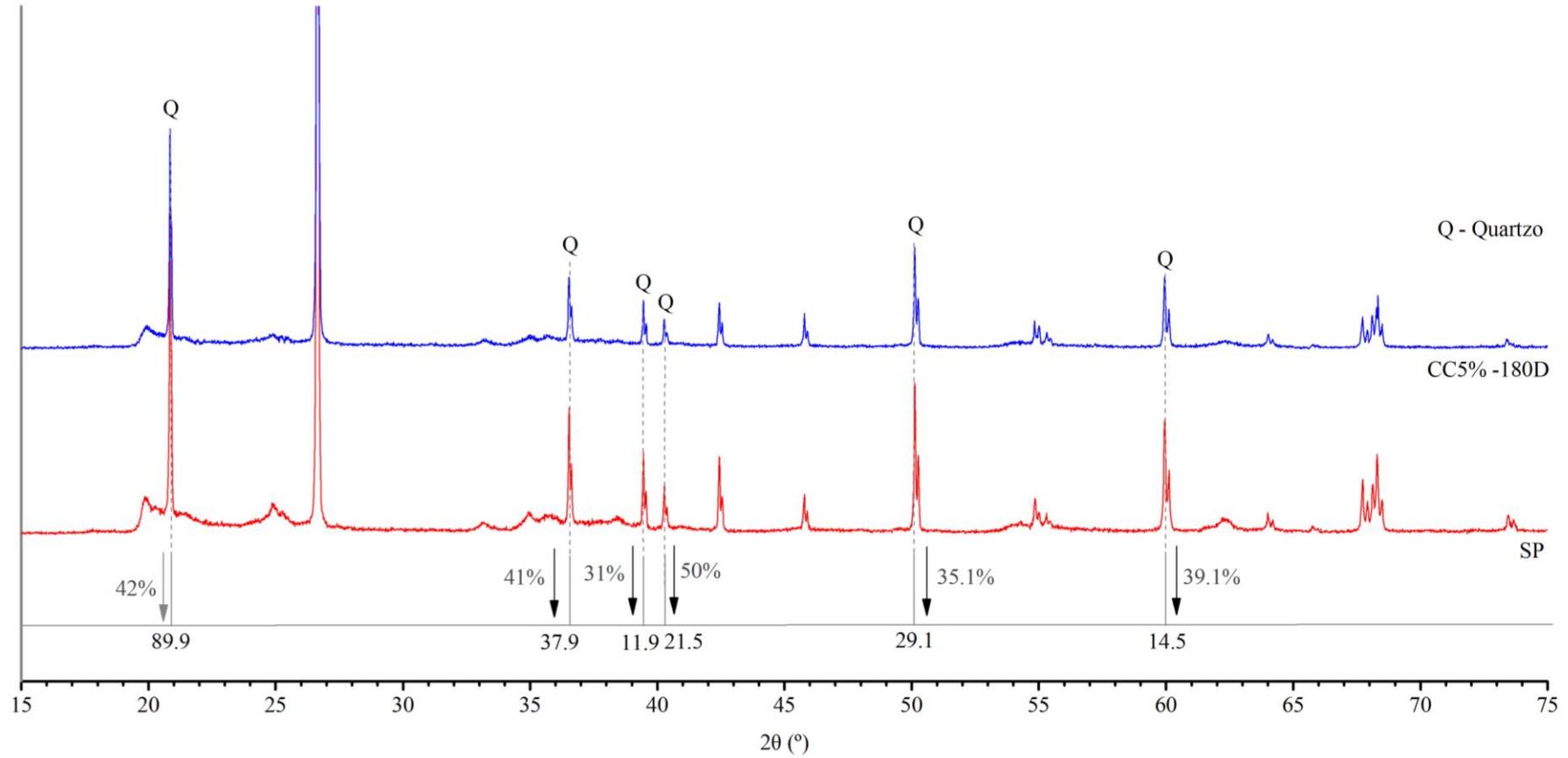
Segundo Vitale *et al.* (2017), a escala de tempo das reações químicas que ocorrem após a adição de cal dependem da mineralogia dos argilominerais. Conforme os autores, a baixa reatividade da caulinita à cal foi detectada como um atraso na precipitação de novas fases hidratadas, sendo que o desaparecimento dos picos de cal nas análises DRX ocorreu após 60 dias. Além disso, o aparecimento de picos bem definidos, oriundos da formação de produtos cimentantes foi detectável somente em idades mais avançadas (270 dias). Zhou e Gunter (1992) e Boardman *et al.* (2001) também observaram em seus estudos a baixa reatividade da caulinita.

O consumo da cal adicionada demonstra o progresso das reações pozolânicas entre a cal e a argila, já que pode ser verificado junto com esse consumo, a redução da intensidade dos picos dos argilominerais com o avanço nos tempos de cura. Salienta-se que não foi constatada nas análises DRX picos característicos de produtos cimentantes tipo C-S-H e C-A-H, o que não quer dizer que esses não estejam presentes em menores intensidades ou estejam nas mesmas distâncias de outros elementos da mistura, já que foi constatado o aumento da resistência por meio dos ensaios mecânicos (RCS e RTC) e mudança textural por meio das análises MEV.

A Figura 50 apresenta as análises DRX do solo puro e da mistura de solo com cal calcítica curada por 180 dias. Nela, foram destacadas as diferenças entre as contagens dos picos de quartzo que apresentaram maior diferença, além da diferença percentual entre essas contagens.

A partir dessa análise, foi possível constatar o consumo do quartzo na mistura de solo com cal calcítica. Akula e Little (2020) também observaram a redução dos picos de quartzo em misturas de solo-cal, os autores atribuíram isso à destruição parcial da estrutura mineral do silicato devido ao alto pH do meio. Outros autores como Dhar e Hussain (2019) também observaram a redução dos picos de quartzo.

Figura 50: Comparação entre os resultados de DRX do SP e da mistura CD5% aos 180 dias de cura

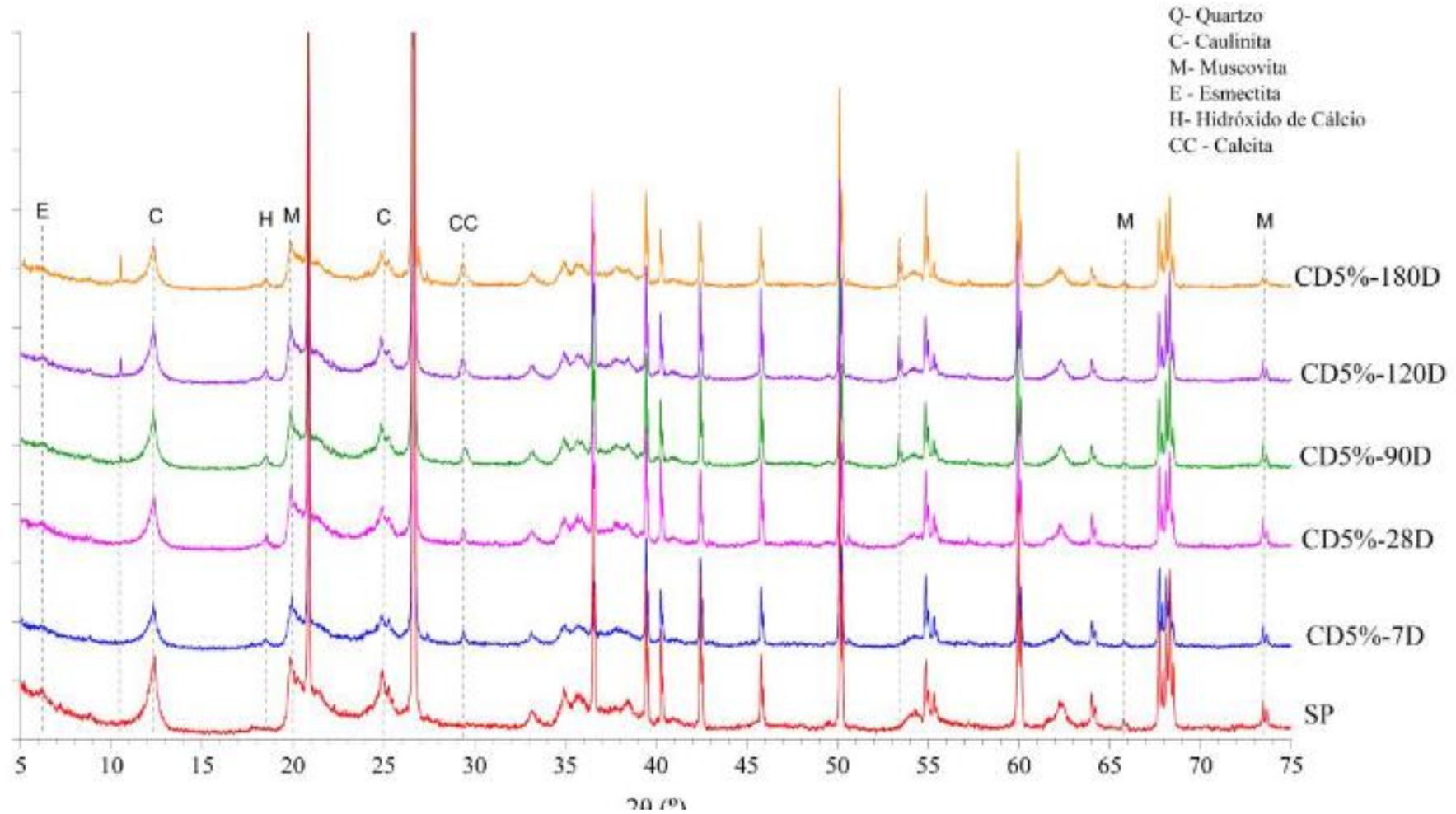


A Figura 51 apresenta um comparativo das análises DRX do solo puro e das misturas de solo com cal dolomítica.

De acordo com as análises realizadas, observa-se que a esmectita (E) é parcialmente consumida logo após os sete dias. A adição de cal propiciou o aparecimento de um pico de hidróxido de cálcio (H) próximo aos 19° e 28° aos 7 dias, sendo que o primeiro não teve redução perceptível nas análises até os 180 dias, já o segundo desapareceu na análise de 28 dias. Os picos de caulinita (C), bem como os de muscovita (M) tiveram redução nas suas intensidades com o aumento no tempo de cura.

Foi observado um pico de calcita (CC), carbonato de cálcio, próximo aos 30° a partir dos 7 dias. Além disso, observou-se o surgimento de picos não identificados a partir de 90 dias, próximos a 11 e 54°. O aparecimento desses picos pode ajudar a explicar outros resultados apresentados, já que uma mudança textural considerável das amostras foi observada nas análises MEV e não houve aumento na RCS do material com o aumento do tempo da mistura CD5%. Nota-se ainda, conforme análise DRX, o consumo de argilominerais até os 180 dias.

Figura 51: Comparação entre os resultados de DRX do SP e da mistura CD5% aos 180 dias de cura



4.6 ANÁLISES MECANÍSTICAS DE PAVIMENTOS COM CAMADAS SOLO-CAL

4.6.1 Análises das Estruturas

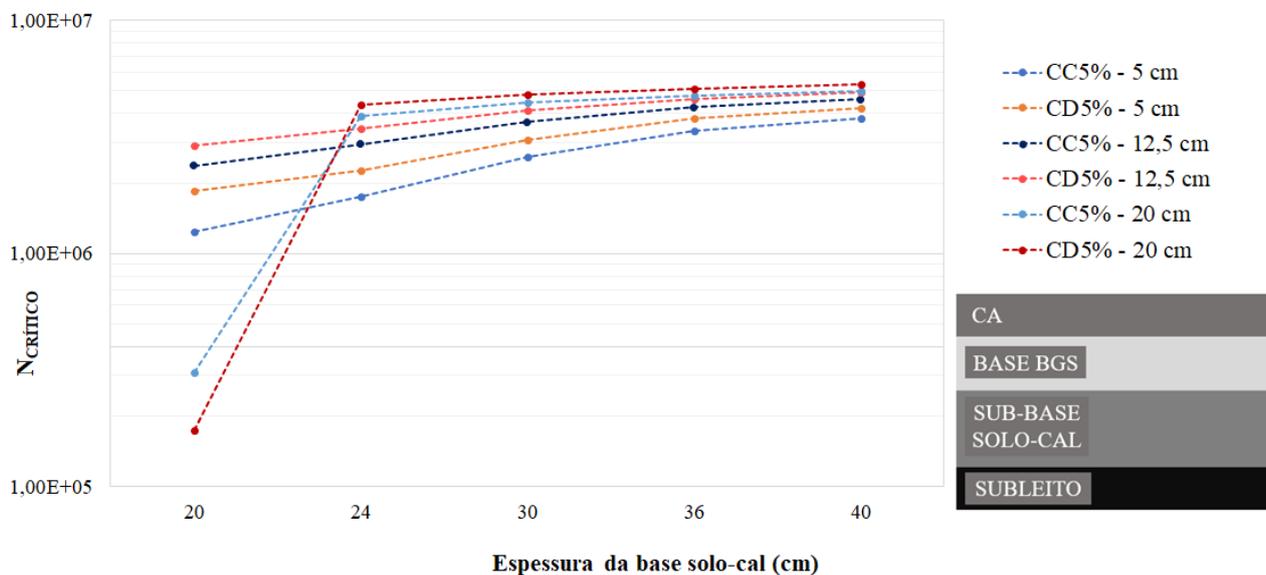
Os próximos subitens apresentam os valores de vida de serviço ($N_{\text{crítico}}$) associado a um determinado mecanismo de ruptura para cada estrutura analisada. Dessa forma, os valores de $N_{\text{crítico}}$ referem-se ao primeiro mecanismo de ruptura de cada estrutura analisada, seja ele, fadiga do revestimento asfáltico, fadiga da camada cimentada, cisalhamento da camada granular, etc. A ordem das falhas dos mecanismos de ruptura observada é apresentada no apêndice dessa dissertação. Por fim, salienta-se que não é analisada à parte o comportamento das camadas solo-cal, mas sim, seu comportamento no desempenho global do pavimento.

4.6.1.1 Análise da Estrutura 1

A Figura 52 apresenta os valores de $N_{\text{crítico}}$ considerando a Estrutura 1, representada na mesma Figura. Salienta-se que para todas as análises realizadas para a Estrutura 1, o mecanismo de ruptura crítico foi a fadiga do revestimento asfáltico, seguida pelo esmagamento inicial das camadas cimentadas de sub-base mais espessas (de 28 a 40 cm) e fadiga da camada cimentada para espessuras menos espessas (de 20 a 26 cm para CC5% e 24 cm para CD5%). Os resultados completos das análises mecanísticas são apresentados em forma de tabela no apêndice desse trabalho.

Observa-se que, com o aumento da espessura do revestimento asfáltico de 5 para 12,5 cm, não são constatados aumentos consideráveis no valor de $N_{\text{crítico}}$. Isso só ocorre quando a espessura do revestimento asfáltico é aumentada para 20 cm.

Quanto à variação da espessura da camada de sub-base (solo-cal), quando o revestimento asfáltico adotado é de 5 cm, não são observados ganhos estruturais. Entretanto, com o aumento da espessura do revestimento asfáltico para 12,5 cm, observa-se leve aumento no valor de $N_{\text{crítico}}$ conforme o aumento da espessura da sub-base. Esse ganho no valor de $N_{\text{crítico}}$ com o aumento da espessura da sub-base é mais pronunciado nas análises com revestimento de 20 cm.

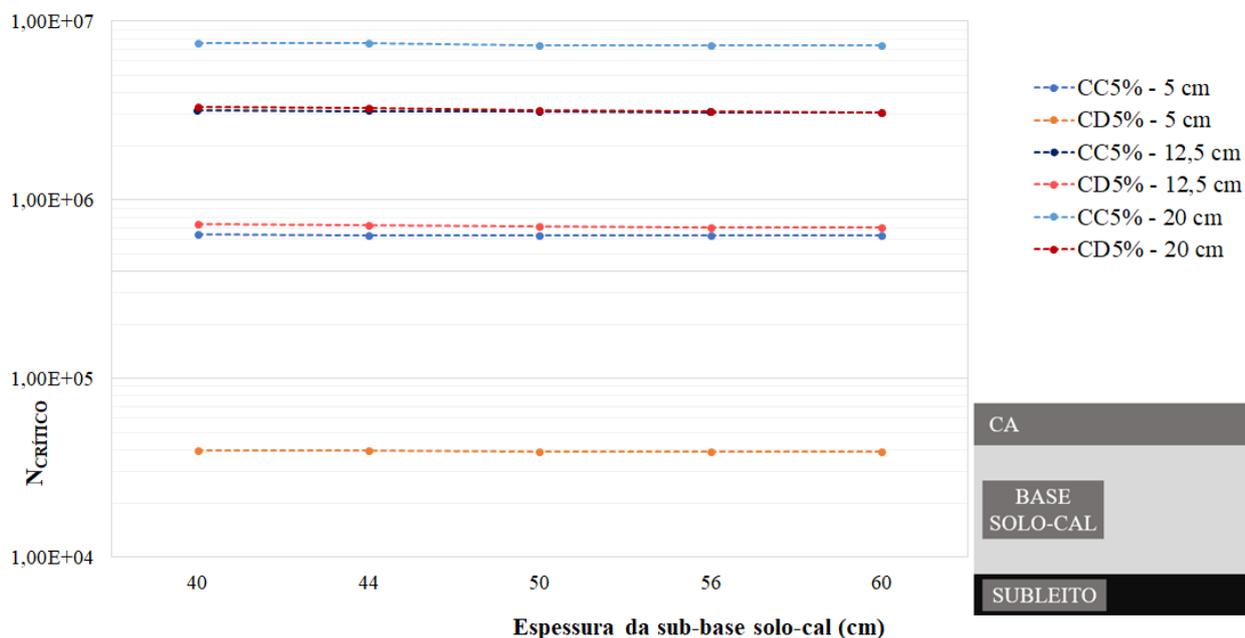
Figura 52: $N_{\text{crítico}}$ das análises para a Estrutura 1

De forma geral, observa-se que o comportamento estrutural das misturas de solo com cal dolomítica se assemelha ao das misturas com cal calcítica, chegando a valores de $N_{\text{crítico}}$ muito próximos para as mesmas condições.

4.6.1.2 Análise da Estrutura 2

A partir da Figura 53 torna-se nítido que o aumento da espessura das camadas de solo-cal, usadas como base e sub-base, não resulta em melhorias estruturais no pavimento. Isso é justificável pelo fato do mecanismo de ruptura crítico, considerando ambas as cales, ser o esmagamento inicial. Esse tipo de ruptura é potencializado pelo fato de não haver uma camada sobre o solo-cal (como no caso da Estrutura 1), que poderia absorver as tensões de compressão. Ainda, como os valores relativos à resistência à compressão simples da mistura de solo com cal dolomítica são consideravelmente mais baixos que a da mistura com cal calcítica, a diferença no valor de $N_{\text{crítico}}$ entre as misturas é justificada.

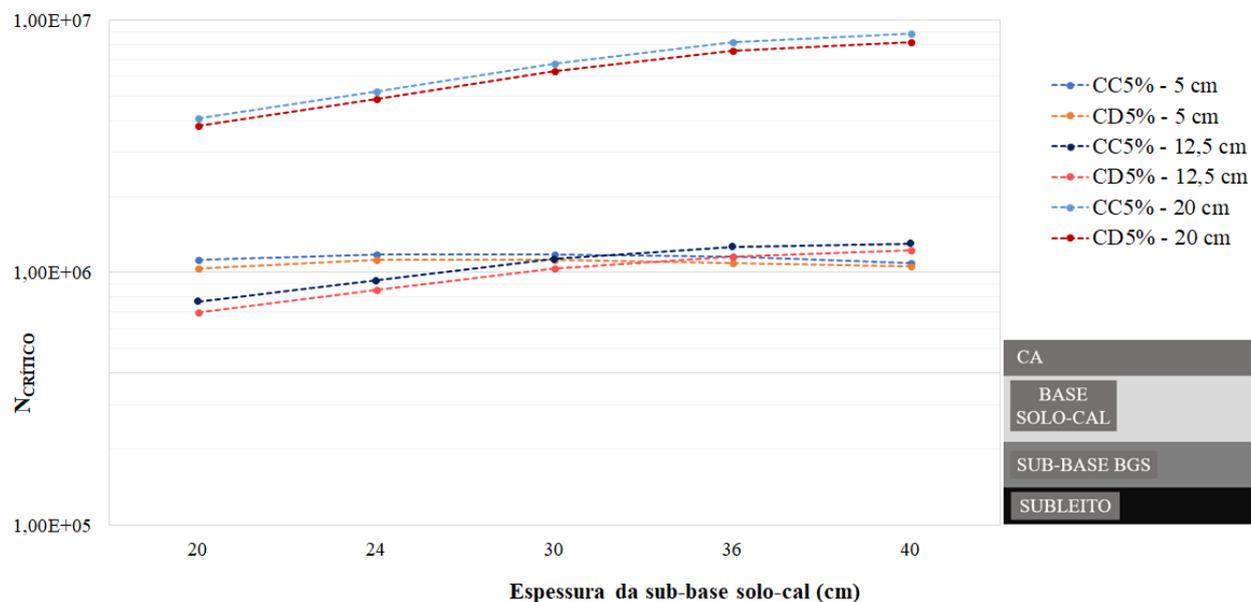
Além disso, nota-se que na Estrutura 2 o aumento da espessura do revestimento asfáltico resulta em aumentos consideráveis no valor de $N_{\text{crítico}}$, o que não ocorre na Estrutura 1. Ainda, é notória a diminuição da capacidade estrutural das misturas com cal dolomítica em relação às misturas com cal calcítica, devido a menor capacidade de suporte e rigidez.

Figura 53: $N_{\text{crítico}}$ das análises para a Estrutura 2

4.6.1.3 Análise da Estrutura 3

Na Estrutura 3 (Figura 54), observa-se um leve aumento do $N_{\text{crítico}}$ com o aumento da espessura da camada de base nas estruturas com revestimento de 5 e 12,5 cm. Para as estruturas com revestimento de 20 cm, o valor de $N_{\text{crítico}}$ aumenta bruscamente nos primeiros acréscimos de espessura da base cimentada. Isso ocorre porque o mecanismo de ruptura que antes era o cisalhamento da camada granular, passa a ser a fadiga da camada cimentada.

Assim como na Estrutura 1, o desempenho global do pavimento não apresenta diferença considerável para as misturas com cal calcítica ou dolomítica se consideradas as mesmas espessuras de revestimento asfáltico.

Figura 54: $N_{\text{crítico}}$ das análises para a Estrutura 3

4.6.1.4 Síntese dos Resultados

A Estrutura 3 alcançou os maiores valores para o $N_{\text{crítico}}$, seguida da Estrutura 1 e então da 2. As duas estruturas com melhor desempenho incluem a camada de BGS em sua estrutura. No caso da Estrutura 1, auxiliando na atenuação das tensões verticais que chegam na camada cimentada, e na Estrutura 2, funcionando como uma camada de suporte à camada de solo estabilizada.

O aumento da espessura do revestimento asfáltico resultou em diferenças expressivas na vida útil do pavimento somente para a Estrutura 2. Ademais, o aumento da espessura das camadas cimentadas só resultou em ganhos na vida útil do pavimento para a Estrutura 1, considerando a espessura de 20 cm de revestimento asfáltico, e para a Estrutura 3.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

Esse capítulo apresenta as considerações finais dessa pesquisa, abordadas em tópicos, além de trazer sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

a) Quanto às metodologias de dosagem adotadas:

Os Limites de Atterberg indicaram boa interação do solo com ambas as cales. Houve considerável redução no Limite de Liquidez e no Índice de Plasticidade, além de um leve aumento no Limite de Plasticidade pra as misturas com ambas as cales. A partir da adição de 3% de cal houve tendência à estabilidade, notando-se pouca variação nos valores obtidos.

A Metodologia do pH, tendo como teor ótimo aquele que leva ao valor de pH de 12,3, indicou o teor de 3% de cal calcítica como mínimo para fins de estabilização, diferente da cal dolomítica que atingiu esse pH somente com o teor de 5%.

b) Quanto aos parâmetros obtidos no ensaio de compactação:

Notou-se diminuição da massa específica aparente seca máxima para as misturas de solo-cal, com ambas as cales (calcítica e dolomítica) e com ambos os teores (3 e 5%), em relação ao solo puro. Também foi observado o deslocamento das curvas de compactação para direita, resultando no aumento no teor de umidade ótimo das misturas, sendo maior no teor adotado como alto (5%), para ambas as cales.

c) Quanto aos ensaios laboratoriais de resistência à compressão simples (RCS) e resistência à tração por compressão diametral (RCD):

O solo classificado pedologicamente como Argissolo Vermelho mostrou-se reativo à cal calcítica, resultando em aumentos das resistências à compressão simples e à tração na compressão com o aumento do tempo de cura. A cal dolomítica não se mostrou reativa, não resultando em aumentos na resistência mecânica com o aumento no tempo de cura.

Por meio do gráfico de Pareto dos efeitos padronizados traçado por meio de análise de regressão múltipla, observou-se que a interação das variáveis com maior efeito na variável resposta RCS foram, respectivamente: teor x tempo de cura, tipo de cal, tempo de cura x tipo de cal, teor, teor x

tempo de cura. Em relação à variável de resposta RCD, a interação das variáveis com maior efeito foram, respectivamente: tempo de cura x tipo de cal, tipo de cal, teor x tipo de cal, teor x tempo de cura, teor empregado.

d) Quanto aos ensaios laboratoriais de resistência à tração na flexão (RTF):

Os valores de RTF obtidos para o Argissolo Vermelho analisado foram bem inferiores aos de Kleinert (2021) para um Argissolo Vermelho Amarelo, utilizando os mesmos teores e tipo de cal. Os valores obtidos nessa pesquisa assemelharam-se muito mais aos do Latossolo, também analisado por Kleinert (2021).

e) Em relação às curvas de tensão de tração normalizada por deformação, a mistura com cal dolomítica mostrou-se mais deformável que a mistura com cal calcítica, que apresentou maior rigidez. Comparando os resultados de deformação na ruptura com os obtidos por Kleinert (2021), a mistura de Argissolo Vermelho com teor de 5% de cal dolomítica apresentou-se cerca de 37% superior à média das outras misturas. Quanto às análises de microestrutura e mineralogia:

Nas análises MEV, observou-se para ambas as misturas (CC5% e CD5%) fechamento da matriz porosa do solo natural logo aos 7 dias, constatando-se aglomerações e floculações. Nos tempos de cura seguintes (90, 120 e 180 dias), observou-se maior intertravamento das matrizes em ambas as misturas. A mistura com cal dolomítica apresentou um aspecto de folhas sobrepostas nos pontos de cimentação, além da dispersão de algo semelhante a um pó solto, que pode ser relacionado às impurezas da cal. Já as misturas com cal calcítica apresentaram matriz mais fechada, reduzindo sua porosidade com o tempo de cura. Pela análise EDS também foi observado o aumento da porcentagem de silício (Si) nos pontos analisados aos 180 dias de cura com relação ao solo puro. Essa observação está relacionada com a formação de produtos cimentantes.

Nas análises DRX foi constatado que o solo puro apresentou picos característicos de quartzo, caulinita, muscovita, esmectita, anatase e hematita. Quando adicionado o teor de 5% de cal calcítica, observou-se o desaparecimento quase completo desse pico aos 180 dias, sendo que este foi consumido rapidamente (aos 7 dias), provavelmente nas reações iniciais. A esmectita, argilomineral do tipo 2:1, foi rapidamente consumida (7 dias), já a caulinita e a muscovita, argilominerais do tipo 1:1, foram gradualmente consumidas ao longo do tempo de cura. Também se observou redução dos picos de quartzo. E não foram constatados novos picos relativos à formação de produtos cimentantes.

No caso da mistura com 5% de cal dolomítica, foi constatado o desaparecimento do pico de esmectita após 7 dias, bem como reduções nos picos de caulinita e esmectita, embora pouco

perceptíveis. Também não foram observadas reduções importantes nos picos de cal. Além disso, observou-se o aparecimento de picos de calcita.

f) Quanto às análises mecânicas empregando as misturas estudadas:

Foram verificadas vidas de serviço muito próximos para as Estruturas 1 e 3 quando utilizadas ambas as misturas de solo-cal. Essas estruturas apresentaram desempenho superior à Estrutura 2, na qual a base e a sub-base eram compostas unicamente por solo-cal, sem material granular (BGS). Ainda, de todas as Estruturas analisadas, a que apresentou desempenho superior foi a 3, composta por base de mistura solo-cal e sub-base de BGS. Esperava-se que a mistura com 5% de cal dolomítica tivesse mau comportamento no desempenho global do pavimento, tendo em vista os resultados obtidos nos ensaios mecânicos. Dessa forma, a expectativa era que os valores de $N_{crítico}$ também fossem inferiores àqueles apresentados pelas estruturas contemplando a mistura com 5% de cal calcítica, o que não aconteceu.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Ampliar o grupo de solos analisados empregando ambas as cales, tomando como referência a caracterização pedológica;
- Analisar o ciclo de vida de pavimentos com camadas de solo-cal;
- Realizar ensaios de fadiga de misturas solo-cal;

REFERÊNCIAS

ABDI, M. R.; CHEHREGOSHA, A.; FARZALIZADEH, R. Effects of miscellaneous plasticity on behavior of lime-treated kaolinites. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 15, n. 8, p. 1040–1050, 2021.

ARAUJO, A. F. **Avaliação de misturas de solos estabilizados com Cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do Estado do Ceará**. 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6508**: Determinação da massa específica - Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm. Rio de Janeiro, 1984. 8 p.

_____. **NBR 7180: Solo - Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016a. 3 p.

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

_____. **NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016c. 8 p.

_____. **NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.

_____. **NBR 7182: Solo: Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 2020. 9 p.

AKULA, P.; LITTLE, D. N. Analytical tests to evaluate pozzolanic reaction in lime stabilized soils. **MethodsX**, v. 7, n. January, 2020.

AL-MUKHTAR, M.; LASLEDJ, A.; ALCOVER, J. F. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C. **Applied Clay Science**, v. 50, n. 2, p. 191–198, 2010.

AMADI, A. A.; OKEIYI, A. Use of quick and hydrated lime in stabilization of lateritic soil: comparative analysis of laboratory data. **International Journal of Geo-Engineering**, v. 8, n. 1, 2017.

ANDAY, M. C. Curing Lime-Stabilized Soils. **Highway Research Board**, n. 29, p. 13–26, 1961.

ARABI, M.; WILD, S. Microstructural development in cured soil-lime composites. **Journal of**

Materials Science, v. 21, n. 2, p. 497–503, 1986.

ARMAN, A.; MUNFAKH, G. Lime stabilization of organic soils. **Highway Research Record**, n. 14, p. 37–45, 1972.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D5102: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime**. West Conshohocken, PA, 2009. 7 p.

_____. **D 1635: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam with Third-Point Loading**. West Conshohocken, PA, 2012, 3 p.

_____. **D 559-96: Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures**. West Conshohocken, PA, 2015a.

_____. **D 3282: Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes**. West Conshohocken, PA, 2015b.

_____. **D 6276 - Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization**. West Conshohocken, PA, 2019.

ATHANASOPOULOU, A. Addition of lime and fly ash to improve highway subgrade soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 4, p. 773–775, 2014.

AUSTROADS. **AP-T101/08: The Development and Evaluation of Protocols for the Laboratory Characterisation of Cemented Materials**. Sydney, 2008. 88 p. ISBN: 978-1-921329-74-6.

_____. **AP-T198-12: Preliminary Investigation of the Influence of Micro-cracking on Fatigue Life of Cemented Materials**. Sydney, 2012. 59 p. ISBN: 978-1-921991-10-3.

AZEVEDO, André Luis Cairo de. **Estabilização de solos com adição de cal : um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal**. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 560 p. ISBN: 978-8586238567.

BALDOVINO, J. A.; MOREIRA, E. B.; TEIXEIRA, W.; IZZO, R. L. S. Effects of lime addition on

geotechnical properties of sedimentary soil in Curitiba, Brazil. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 10, n. 1, p. 188–194, 2018.

BARBOSA, Valquiria. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal**. Recife, 2013. 111 f. Dissertação (mestrado) - UFPE, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2013.

BEHAK, Leonardo. **Estabilização de um solo sedimentar arenoso do uruguaí com cinza de casca de arroz e cal**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 171 p., 2007.

BEHAK, Leonardo. **Análise Estrutural de Pavimentos de Baixo Volume de Tráfego Revestidos com Solo Modificado com Cal Considerando Ensaio Laboratoriais e Monitoramento de Trechos Experimentais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2011.

BELCHIOR, Ingrid Milena Reyes Martinez. **Behavior of a Lime-Treated Expansive Soil**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ), Rio de Janeiro, 2016.

BENETTI, Mozara. **Comportamento hidráulico e mecânico de um solo residual tratado com cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2015.

BHATTACHARJA, S.; BHATTY, J. I. Comparative Performance of Portland Cement and Lime Stabilization of Moderate to High Plasticity Clay Soils. **RD125**, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2003. 26 p. ISBN: 0-89312-215-7.

BHATTACHARJA, S.; BHATTY, J. I.; TODRES, H. A. Stabilization of clay soils by portland cement or lime—a critical review of literature. **PCA R&D**, n. 2066, Portland Cement Association, Skokie, Illinois USA, 2003, 60 p.

BHUIYAN, J. U.; LITTLE, D. N.; GRAVES, R. E. Evaluation of Calcareous Base Course Materials Stabilized with Low Percentage of Lime in South Texas. **Transportation Research**

Board, n. 1486, p. 77–87, 1995.

BUENO, E. S. **Estudo de Alguns Fatores que Podem Afetar a Durabilidade de Misturas Solo-Cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 149 f., 2011.

BULMAN, J. N. Soil stabilization in Africa. **TRRL Report LR 476**, Crowthorne, 1972. 11 p.

CALDERANO, S. B.; DUARTE, M. N.; GREGORIS, G. Análise Mineralógica das frações argila e silte por difratometria de raios-x. Cap. 3. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (edi.). Manual de métodos de análise de solo. Brasília: EMBRAPA, 2017. p. 452-471. p. 452-471. ISBN: 978-85-7035-771-7.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2008, 249 p.

CASTRO, Francisco José Casanova de Oliveira e. **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 Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 1995.

CERATTI, Jorge A. Pereira. **Efeitos da adição de cal e cinza volante nas propriedades de um solo residual compactado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 1979.

CHAKRABORTY, S.; NAIR, S. Impact of different hydrated cementitious phases on moisture-induced damage in lime-stabilised subgrade soils. **Road Materials and Pavement Design**, v. 19, n. 6, p. 1389–1405, 2017. DOI: 10.1080/14680629.2017.1314222.

CLARE, K. E.; CRUCHLEY, A. E. Laboratory experiments in the stabilization of clays with hydrated lime. **Geotechnique**, v. 7, n. 2, p. 97–111, 1957.

CORRÊA, J. F. **Avaliação das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2008.

COSTA, Cintia Macêdo Pereira da. **Caracterização e estabilização com cal de uma argila mole**

do mangue de João Pessoa. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1992.

COSTA, M. A. Da. **Resistência ao Cisalhamento de uma Argila Mole Estabilizada com Cal (CaO).** Tese (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Centro de Ciências e Tecnologia (DEC) da Universidade Federal da Paraíba (UFPA), Campina Grande, 1977.

CROCKFORD, W. W.; DALLAS N. LITTLE. Tensile fracture and fatigue of cement-stabilized soil. **Journal of Transportation Engineering**, v. 113, n. 5, p. 520–537, 1987.

DAS, B. M. **Fundamentos da Engenharia geotécnica.** 6 ed. Tradução All Talks. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 630 p. Título original: Principles of geotechnical engineering. ISBN: 85-221-0548-0.

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

DAVIDSON, L. K.; DEMIREL, T.; HANDY, R. L. Soil Pulverization and Lime Migration Soil-Lime Stabilization. **Highway Research Board**, n. 92, p. 103–126, 1965.

DE PAIVA, S. C. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DOS SOLOS EXPANSIVOS DOS MUNICÍPIOS DE CABROBÓ, PAULISTA E IPOJUCA - PE E DE SUAS MISTURAS COM CAL.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, 2016. 168 f.

DEMPSEY, B. J.; THOMPSON, M. R. Durability properties of lime-soil Mixtures. **Highway Research Board**, v. 235, n. Washington D.C., p. 61–75, 1968.

DENEELE, D.; NAEL, J.; DONY, A.; COLIN, J.; HERIER, G.; LESUEUR, D. LA CARBONATATION D'UN SOL TRAITÉ A LA CHAUX – APPROCHE EXPERIMENTALE. **In: Colloque TerDOUEST 2013 Seminar**, p. 11, 2013.

DENEELE, D.; LE RUNIGO, B.; CUI, Y.; CUISINIER, O.; FERBER, V. Experimental assessment regarding leaching of lime-treated silt. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 1032–1040, 2016.

DHAR, S.; HUSSAIN, M. The strength and microstructural behavior of lime stabilized subgrade

soil in road construction. **International Journal of Geotechnical Engineering**, p. 1–13, 2019.

DI SANTE, M.; FRATALOCCHI, E.; MAZZIERI, F.; PASQUALINI, E. Time of reactions in a lime treated clayey soil and influence of curing conditions on its microstructure and behaviour. **Applied Clay Science**, v. 99, p. 100–109, 2014.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA – **DNIT ME 136: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. p. 9, 2018.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. Reaction of hydrated lime with pure clay mineral in soil stabilization. **Highway Research Board**, v. 262, n. 8, p. 51–63, 1960.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. A Quick Test to Determine Lime Requirements For Lime Stabilization. **In: The 45th Annual Meeting of the committee on Lime and Lime-Fly Ash Stabilization**, p. 61–72, 1966.

EADES, J. L.; NICHOLS JR, F. P.; GRIM, R. E. Formation of new minerals with lime stabilization as proven by field experiments in virginia. **Highway Research Board Bulletin**, n. 335, p. 31–39, 1962.

EMMERT, Fabiano. **Avaliação do emprego da técnica de estabilização de solo na melhoria de estradas florestais da região de Niquelândia-GO**. 2010. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

FEDRIGO, W. **Factors affecting strength, stiffnes and fatigue behaviour of cold recycled cement-treated mixtures**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2019.

FONTANA, A.; CAMPOS, D. V. B. DE. Parte III - Análises da Matéria Orgânica. **In: TEIXEIRA, P. C. et al. (Eds.). Manual de Métodos de Análise dedr Solo**. 3. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017. p. 359–426.

GEORGE, S. Z.; PONNIAH, D. A.; LITTLE, J. A. Effect of temperature on lime-soil stabilization.

Construction and Building Materials, v. 6, n. 4, p. 247–252, 1992.

GLENN, G. R.; HANDY, R. L. Lime-Clay Mineral Reaction Products. **Highway Research Board Bulletin**, n. 4, p. 70–82, 1963.

GODOI, L. C. **Aplicação do ensaio de flexão em amostra semicircular para avaliação de trincamento de misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2017.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal - Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 1 ed. ed. São Paulo: PINI, 1997.

HARTY, J.; THOMPSON, M. R. Lime reactivity of tropical and subtropical soils. **Highway Research Board**, Washington, DC, v. 442, p. 102–112, 1973.

HERRIN, M.; MITCHELL, H. Lime-soil mixtures. **Highway Research Board**, Washington, DC, v. 304, p. 99–138, 1961.

HILT, G. HARRISON; DAVIDSON, D. T. Lime fixation in clayey soils. **Highway Research Board**, n. 262, p. 20–32, 1961.

HO, C.; HANDY, R. L. Characteristics of Lime Retention by Montmorillonitic Clays. **Highway Research Record**, n. 29, p. 55–69, 1963.

HOOVER, J. M. Evaluation of Experimental Stabilized Soil Base Construction, Webster County, Iowa. **Highway Research Record**, n. 92, p. 21–42, 1965.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual Técnico de Pedologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, v. 5, n. 4. 2007. ISSN: 0103-9598.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS (IPR). **DNIT 419-ME: Pavimentação – Solo-Cal – Estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo – Método de ensaio**. p. 8 p., 2019a.

_____. **DNIT 418-EM: Pavimentação – Solo-Cal – Cal Virgem e Cal Hidratada – Especificação de material**. p. 6 p., 2019b.

JAN, M. A.; WALKER, R. D. Effect of Lime, Moisture and Compaction on a Clay Soil. **Highway Research Record**, n. 29, p. 1–12, 1963.

JHA, A. K.; SIVAPULLAIAH, P. V. Lime Stabilization of Soil: A Physico-Chemical and Micro-Mechanistic Perspective. **Indian Geotechnical Journal**, v. 50, n. 3, p. 339–347, 2020.

JOAQUIM, Amaro Gabriel. **Estudo de dois solos tropicais melhorados com cimento ou cal para emprego em camadas superiores de estradas não pavimentadas**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, 2017.

JOHANN, Amanda Dalla Rosa. **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**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2013.

JOHNSON, A. Morgan. Laboratory experiments with lime-soil mixtures. **Highway Research Board Proceedings**. 1949.

JSCE-SF4. Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. **Japan Society of Civil Engineering**, v. 3, 1984. 4 p.

KERN, C. **Estudo do efeito do grau de saturação no comportamento de solos utilizados em sub-bases de pavimentos delgados**. Tese em andamento (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2021.

KHATTAB, S. A. A.; AL-MUKHTAR, M.; FLEUREAU, J. M. Long-Term Stability Characteristics of a Lime-Treated Plastic Soil. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 19, n. 4, p. 358–366, 2007.

KLEINERT, T. R. **ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS COM CAL E IMPACTOS NO DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE PAVIMENTOS**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2021.

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

LIMA, Cláudio Augusto de Paula. **Comportamento mecânico com resíduos industriais, sob flexão a quatro pontos, para construção de pavimentos flexíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Manaus, 2017.

LIMA, V. C.; LIMA, M. R. DE; MELO, V. DE F. **Conhecendo os principais solos do Paraná**. 1. ed. Curitiba - PR: SBCS - Núcleo do Paraná, 2012. ISBN: 978-85-89950-07-7.

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**, Florida: Air Force Engineering and Services Center, Tyndall Air Force Base, 1987. 340 p.

LITTLE, D. N. **EVALUATION OF STRUCTURAL PROPERTIES OF LIME STABILIZED SOILS AND AGGREGATES**. 1 ed. National Lime Association, v. 1, 1999. 97 p.

LITTLE, D. N.; YUSUF, F. A. M. S. Example problem illustrating the application of the National Lime Association Mixture Design and Testing Protocol (MDTP) to ascertain engineering properties of lime-treated subgrades for mechanistic pavement design/analysis. **National Lime Association**, p. 24, 2001.

LOPES JUNIOR, Luizmar da Silva. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Porto Alegre, 2007.

LOPES JUNIOR, Luizmar da Silva. **Metodologia de previsão do comportamento mecânico de solos tratados com cal**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Porto Alegre, 2011.

LÓPEZ, M. A. C. **Reciclagem de pavimentos flexíveis com adição de cimento Portland: estudo de fadiga através do ensaio de flexão em viga quatro pontos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 162 f., 2016.

LOVATO, R. S. **Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com**

Cal, Aplicado à Pavimentação. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 144 f., 2004.

MACHADO, C. C.; SANT’ANNA, G. L.; LIMA, D. C.; CARVALHO, C. A. B; ALMEIDA, A.; OLIVEIRA, T. Durabilidade de solos estabilizados quimicamente com vistas á aplicação em estradas florestais. **Revista Árvore**, v. 30, n. 6, p. 981–988, 2006.

MAIOR, I. Souto. Influência da qualidade da cal (envelhecimento) na estabilização de solos lateríticos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Campina Grande, Campina Grande, 1983.

MALLELA, J.; QUINTUS, H. VON; SMITH, K. L. Consideration of Lime-Stabilized Layers in Mechanistic-Empirical Pavement Design. **USA: The National Lime Association**, v. 217, p. 38, 2004.

MALYSZ, R. **Desenvolvimento de um equipamento triaxial de grande porte para avaliação de agregados utilizados como camada de pavimentos.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2009.

MANZATTO, C. V.; FREITAS J., E.; PERES, J. R. R. **Uso Agrícola dos Solos Brasileiros.** 1 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2002. 174 p. ISBN: 85-85864-10-9.

MARCON, A. F. **Durabilidade e Módulo de Elasticidade de Misturas Areia-Cal-Cinza Volante. Antonio Fortunato Marcon.** Tese (Mestrado em Ciência) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 130 f., 1977.

MATEOS, M.; DAVIDSON, D. T. Lime and Fly Ash Proportions in Soil, Lime and Fly Ash Mixtures, and Some Aspects of Soil Lime Stabilization. **Highway Research Board Bulletin**, n. 335, p. 40–64, 1962.

MEDEIROS, A. A. De L. **Contribuição ao estudo da dosagem de cal para a estabilização de um solo de comportamento laterítico e um não laterítico.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade de São Paulo (USP), 2017.

MALANCONI, Maurício. **Considerações sobre misturas de solos tropicais estabilizados quimicamente para uso como camada de pavimento urbano.** 2012. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

MARIN, Eduardo José Bittar. **Estudo de campo e laboratório do comportamento mecânico de um solo sulfatado estabilizado com cal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2017.

MILLER, R. H.; COUTURIER, R. R. Measuring Thermal Expansion of Lime-Fly Ash-Aggregate Compositions Using SR-4 Strain Gages. **Highway Research Record**, n. 29, p. 83–94, 1963.

NABIL, M.; MUSTAPHA, A.; RIOS, S. Long Term Evaluation of Wetting-Drying Cycles for Compacted Soils Treated with Lime. **In:** KALLEL, A. et al. (Eds.). Recent Advances in Geo-Environmental Engineering, Geomechanics and Geotechnics, and Geohazards. CAJG 2018. Tunisia: Springer International Publishing, 2019. p. 277–281.

NATIONAL LIME ASSOCIATION (NLA). **Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil**, Technical brief, 2006. 6 p.

NARDI, José Vidal. Estabilização de areia com cinza volante e cal; efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 1975.

NÓBREGA, Maria Teresa de. **Contribuição ao estudo da estabilização de solos tropicais com adição de cal para fins rodoviários: aspectos mineralógicos e morfológicos de alguns solos das Regiões Sul e Sudeste do Brasil.** Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Identificação Expedida dos Grupos da Classificação MCT para Solos Tropicais. *In:* COBRAMSEF, 5 ed., 1994, Foz do Iguaçu. **Anais [...]** Paraná, 1994, 8 p.

NÚÑEZ, W. P. **ESTABILIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE UM SOLO RESIDUAL DE ARENITO BOTUCATU VISANDO SEU EMPREGO NA PAVIMENTAÇÃO.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 150 f., 1991.

OLA, S. A. THE POTENTIALS OF LIME STABILIZATION OF LATERITIC SOILS. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics**, v. 11, n. 4, p. 305–317, 1977.

OLIVEIRA, Eduardo de. **Emprego da cal na estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão: estudo de caso no município de Ribeirão das Neves/MG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2010.

OLIVEIRA, Shirley Minnell Ferreira de. **Estudo do comportamento mecânico de misturas de fosfogesso e cal para utilização na construção rodoviária**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ORMSBY, W. C.; KINTER, E. B. Effects of Dolomitic and Calcitic Limes on Strength Development in Mixtures with Two Clay Mineral. **Public Roads**, v. 37, n. 4, p. 149–160, 1973.

OSINUBI, K. J. INFLUENCE OF COMPACTIVE EFFORTS AND COMPACTION DELAYS ON LIME-TREATED SOIL. **Journal of Transportation Engineering**, p. 149–155, 1998.

PESSOA, F. H. C. **AVALIAÇÕES FUNCIONAL E ESTRUTURAL DE TRECHOS DE RODOVIAS NO DISTRITO FEDERAL CONSTRUÍDOS COM DIFERENTES MATERIAIS**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília (UNB), 210 p., 2012.

PIETSCH, P. E.; DAVIDSON, D. T. Effects of Lime on Plasticity and Compressive Strength of Representative Iowa Soils. **Highway Research Board**, Washington, DC, n. 335, p. 11–30, 1962.

POMATTI, K. E. **Estabilização do solo da região de São Pedro de Alcântara – SC com cal visando seu emprego na pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 86 p., 2000.

PORTELINHA, Fernando Henrique Martins. **Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Viçosa, 2008.

PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARJA, S. Effectiveness of portland cement and lime in stabilizing clay soils. **Transportation Research Record**, n. 1652, p. 215–227, 1998.

QUIÑÓNEZ SAMANIEGO, Rúben Alejandro. **Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RAHMAT, M. N.; ISMAIL, N. Effect of optimum compaction moisture content formulations on the strength and durability of sustainable stabilised materials. **Applied Clay Science**, v. 157, p. 257–266, 2018.

RAO, S. M.; ASHA, K. Activation of fly ash-lime reactions: Kinetic approach. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 8, p. 1110–1117, 2012. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000482

REMUS, M. D.; DAVIDSON, D. T. Relation of Strength to composition and density of lime-treated clayey soils. **Highway Research Board Bulletin**, n. 304, p. 65–75, 1961.

ROCHA, Mirella Talitha. **Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, estruturas e construção civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

ROCHA, Gissele Souza. **Efeito da cal na resposta mecânica de um solo residual maduro: análise da resistência à compressão não confinada, permeabilidade, compressibilidade e efeito da cura acelerada na resistência mecânica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

ROQUE, Priscila Fiochi Bento. **Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para utilização em estruturas de pavimentos**. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

ROSE, A. C. The present status of subgrade studies. **Public Roads**, v. 6, p. 137-161, 1926.

RUFO, Rosely Costa. **ESTUDO LABORATORIAL DE MISTURAS DE FOSFOGESSO, SOLO TROPICAL E CAL PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO**. Dissertação (Mestrado em

Meio Ambiente) - Programa de Pós Graduação em Engenharia do Meio Ambiente Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

SANTOS, H. G. DOS; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. DOS; OLIVEIRA, V. Á. DE; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. DE; ARAÚJO FILHO, J. C. DE; OLIVEIRA, J. B. DE; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, EMBRAPA**. 5. ed. Brasília: EMBRAPA, 2013. 356 p. ISBN 978-85-7035-800-4.

SANT'ANNA, Giovani Levi. **Módulo de resiliência de misturas solo-alcatrão, solo-cal- alcatrão e solo-cimento-alcatrão para pavimentação de estradas florestais**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022.

SHARMA, L. K. et al. Experimental study to examine the independent roles of lime and cement on the stabilization of a mountain soil: A comparative study. **Applied Clay Science**, v. 152, n. June, p. 183–195, 2018.

SILVA, M. F. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP), 118 f., 2016.

SILVA, Jayne Araújo. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo potencialmente expansivo, encontrado em Agrestina/PE, aplicando cinza de casca de arroz e cal como aditivos estabilizantes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), 2018.

SILVANI, Carina. **Influência da Temperatura de Cura no Comportamento Mecânico de Misturas Areia-Cinza Volante-Cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2013.

SILVANI, Carina. **Solos artificialmente cimentados em célula cúbica : isotropia a pequenas deformações e na ruptura**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2017.

SIVAPULLAIAH, P. V.; PRASHANTH, J. P.; SRIDHARAN, A. Delay in compaction and

importance of the lime fixation point on the strength and compaction characteristics of soil. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement**, v. 2, n. 1, p. 27–32, 1998.

SILVEIRA, Juçara da. Estudo da permeabilidade e estrutura de solo-cal. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 1979.

STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C. DO; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222 p. ISBN: 978-85 98842-04-2.

SWEENEY, D. A.; WONG, D. K. H.; FREDLUND, D. G. Effect of lime on highly plastic clay with special emphasis on aging. **Transportation Research Record**, v. 1190, p. 13-23, 1988.

TABORDA, Leandro Franco. **Análise de um pavimento semirrígido com base em solo, cal e cinza volante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2012.

TENÓRIO, Eduardo Antonio Guimarães. **Controle da expansão dos solos com resíduos de mármore e cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), 2018.

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

THOMPSON., M. R. Lime reactivity of Illinois soils. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 92, n. 5, p. 67–92, 1966a.

_____. Split-Tensile Strength of Lime-Stabilized Soils. **Highway Research Board, Washington, DC**, n. 92, p. 69–82, 1966b.

_____. Shear strength and elastic properties of lime-soil mixtures. **Highway Research**

Record, n. 139, p. pp 1-14, 1966c.

_____. Factors influencing the plasticity and strength of lime-soil mixtures. **University of Illinois Bulletin**, v. 64, n. 100, p. 1–20, 1967.

THOMPSON, M. R.; DEMPSEY, B. J. Autogenous Healing of Lime-Soil Mixtures. **48th Annual Meeting of the Highway Research Board**, n. 263, p. 1–7, 1969.

VILLALBA, Nestor Masamune Kanazawa. **Durabilidade, Rigidez e Avaliação do Ciclo de Vida de um Solo Dispersivo Estabilizado com Cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2015.

VITALE, E.; DENELE, D.; PARIS, M.; RUSSO, G. Multi-scale analysis and time evolution of pozzolanic activity of lime treated clays. **Applied Clay Science**, v. 141, p. 36–45, 2017.

WANG, J. W.; DAVIDSON, D. T.; ROSAUER, E. A. Comparison of Various Commercial Limes for Soil Stabilization. **Highway Research Board**, p. 65–79, 1962.

WANG, J. W. H.; MATEOS, M.; DAVIDSON, D. T. Comparative effects of hydraulic, calcitic and dolomitic limes and cement in soil stabilization. **Highway Research Record Bulletin**, n. 59, National Research Council, Washington, DC, p. 42–54, 1963.

WEN, H.; MUHUNTHAN, B.; WANG, J.; LI, X. **NCHRP REPORT 789: Characterization of Cementitiously Stabilized Layers for Use in Pavement Design and Analysis**. Washington, DC: TRB, The National Academies Press, 2014. 72 p. ISBN 978-0-309-30813-7. DOI 10.17226/22247.

WINTER, Daniel. **Melhoramento de um solo mole orgânico com o uso de cimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2013.

YILDIRIM, G.; SAHMARAN, M.; AHMED, H. U. Influence of hydrated lime addition on the self-healing capability of high-volume fly ash incorporated cementitious composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 6, p. 1–11, 2015.

ZHAO, H.; LIU, J.; GUO, J.; CHAO, C., GONG, B. Reexamination of Lime Stabilization Mechanisms of Expansive Clay. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 1, 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001040.

APÊNDICES

Tabela 17: Valores RCS

Tipo de cal/Teor	Tempo de cura	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Média +10%	Média -10%	Desvio Padrão	CV (%)
CC 3%	7 dias	1,282	1,29	1,42	1,16	0,043	3,35
		1,251					
		1,337					
CC 5%	7 dias	1,555	1,60	1,76	1,44	0,057	3,57
		1,666					
		1,588					
CD 3%	7 dias	1,396	1,38	1,51	1,24	0,028	2,01
		1,357					
		-					
CD 5%	7 dias	1,228	1,20	1,32	1,08	0,030	2,46
		1,169					
		1,205					
CC 3%	28 dias	1,285	1,43	1,58	1,29	0,143	9,98
		1,448					
		1,570					
CC 5%	28 dias	2,100	2,11	2,32	1,90	0,027	1,29
		2,096					
		2,145					
CD 3%	28 dias	-	1,58	1,73	1,42	0,053	3,38
		1,614					
		1,539					
CD 5%	28 dias	1,247	1,19	1,30	1,07	0,087	7,35
		1,124					
		-					
CC 3%	90 dias	1,530	1,52	1,67	1,36	0,026	1,70
		1,530					
		1,486					
CC 5%	90 dias	2,620	2,84	3,12	2,55	0,250	8,81
		3,110					
		2,780					
CD 3%	90 dias	1,450	1,50	1,65	1,35	0,050	3,33
		1,500					
		1,550					
CD 5%	90 dias	1,210	1,31	1,44	1,17	0,134	10,30
		1,400					
		-					
CC 3%	120 dias	1,894	2,00	2,20	1,80	0,129	6,42
		1,965					
		2,144					
CC 5%	120 dias	3,275	3,34	3,67	3,01	0,058	1,72
		3,356					
		3,387					

		1,644					
CD 3%	120 dias	<u>1,676</u>	1,62	1,79	1,46	0,065	3,99
		1,551					
		<u>1,060</u>					
CD 5%	120 dias	<u>1,273</u>	1,18	1,30	1,06	0,109	9,21
		1,202					
		<u>2,153</u>					
CC 3%	180 dias	<u>2,146</u>	2,19	2,41	1,97	0,065	2,97
		2,262					
		<u>3,830</u>					
CC 5%	180 dias	<u>4,125</u>	3,97	4,37	3,57	0,148	3,73
		3,950					
		<u>1,190</u>					
CD 3%	180 dias	<u>1,232</u>	1,21	1,34	1,09	0,022	1,81
		1,222					
		<u>0,905</u>					
CD 5%	180 dias	<u>1,014</u>	1,00	1,10	0,90	0,091	9,05
		1,085					

Tabela 18: Valores RCD

Tipo de cal/Teor	Tempo de cura	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Média +10%	Média -10%	Desvio Padrão	CV (%)
CC 3%	28 dias	0,190	0,173	0,190	0,156	0,015	8,51
		0,164					
		0,165					
CC 5%	28 dias	0,183	0,191	0,211	0,172	0,014	7,13
		0,207					
		0,184					
CD 3%	28 dias	0,145	0,136	0,150	0,122	0,008	5,82
		0,130					
		0,133					
CD 5%	28 dias	0,205	0,197	0,216	0,177	0,013	6,39
		-					
		0,188					
CC 3%	90 dias	0,203	0,205	0,226	0,185	0,015	7,37
		0,221					
		0,191					
CC 5%	90 dias	0,455	0,425	0,468	0,383	0,028	6,59
		0,420					
		0,400					
CD 3%	90 dias	0,122	0,121	0,133	0,109	0,010	8,23
		0,111					
		0,131					
CD 5%	90 dias	0,100	0,110	0,121	0,099	0,009	8,36
		0,119					
		0,110					
CC 3%	120 dias	0,259	0,265	0,291	0,238	0,010	3,61
		0,260					
		0,276					
CC 5%	120 dias	0,535	0,533	0,586	0,480	0,014	2,55
		0,546					
		0,519					
CD 3%	120 dias	0,122	0,133	0,146	0,119	0,015	11,09
		0,143					
		-					
CD 5%	120 dias	0,103	0,109	0,119	0,098	0,006	5,19
		0,109					
		0,114					

Tabela 19: Análises Mecânicas para Estrutura 1, CC5%

Rev.	Base	Sub-base	1ª Rup.	1ª Rup.	2ª Rup.	2ª Rup.	3ª Rup.	3ª Rup.	4ª Rup.	4ª Rup.	5ª Rup.	5ª Rup.	6ª Rup.	6ª Rup.
cm	cm	cm	N _{crítico}	Tipo										
5	15	40	1,09E+06	FCA	5,74E+06	EI	2,03E+07	FCC	2,73E+07	EA	6,26E+11	DP	2,72E+16	CCG
5	15	38	1,12E+06	FCA	5,77E+06	EI	1,69E+07	FCC	2,75E+07	EA	2,97E+11	DP	3,22E+16	CCG
5	15	36	1,15E+06	FCA	5,81E+06	EI	1,42E+07	FCC	2,77E+07	EA	1,40E+11	DP	3,85E+16	CCG
5	15	34	1,15E+06	FCA	5,85E+06	EI	1,17E+07	FCC	2,79E+07	EA	6,64E+10	DP	4,63E+16	CCG
5	15	32	1,18E+06	FCA	5,91E+06	EI	9,70E+06	FCC	2,81E+07	EA	3,00E+10	DP	5,57E+16	CCG
5	15	30	1,18E+06	FCA	5,96E+06	EI	7,95E+06	FCC	2,84E+07	EA	1,32E+10	DP	6,72E+16	CCG
5	15	28	1,18E+06	FCA	6,03E+06	EI	6,46E+06	FCC	2,87E+07	EA	5,47E+09	DP	8,06E+16	CCG
5	15	26	1,18E+06	FCA	5,19E+06	FCC	6,12E+06	EI	2,91E+07	EA	2,35E+09	DP	9,54E+16	CCG
5	15	24	1,18E+06	FCA	4,13E+06	FCC	6,22E+06	EI	2,96E+07	EA	9,39E+08	DP	1,10E+17	CCG
5	15	22	1,18E+06	FCA	3,23E+06	FCC	6,34E+06	EI	3,02E+07	EA	3,70E+08	DP	1,23E+17	CCG
5	15	20	1,12E+06	FCA	2,50E+06	FCC	6,49E+06	EI	3,09E+07	EA	1,37E+08	DP	1,29E+17	CCG
12,5	15	40	1,31E+06	FCA	1,09E+07	EI	2,26E+07	FCC	5,18E+07	EA	4,25E+12	DP	7,83E+30	CCG
12,5	15	38	1,31E+06	FCA	1,10E+07	EI	1,92E+07	FCC	5,22E+07	EA	2,15E+12	DP	1,03E+31	CCG
12,5	15	36	1,27E+06	FCA	1,11E+07	EI	1,64E+07	FCC	5,27E+07	EA	1,14E+12	DP	1,35E+31	CCG
12,5	15	34	1,23E+06	FCA	1,12E+07	EI	1,38E+07	FCC	5,33E+07	EA	5,51E+11	DP	1,66E+31	CCG
12,5	15	32	1,20E+06	FCA	1,13E+07	EI	1,17E+07	FCC	5,39E+07	EA	2,64E+11	DP	2,06E+31	CCG
12,5	15	30	1,13E+06	FCA	9,74E+06	FCC	1,15E+07	EI	5,47E+07	EA	1,33E+11	DP	2,56E+31	CCG
12,5	15	28	1,07E+06	FCA	8,14E+06	FCC	1,16E+07	EI	5,54E+07	EA	5,99E+10	DP	3,20E+31	CCG
12,5	15	26	1,01E+06	FCA	6,74E+06	FCC	1,18E+07	EI	5,61E+07	EA	2,73E+10	DP	3,98E+31	CCG
12,5	15	24	9,30E+05	FCA	5,58E+06	FCC	1,19E+07	EI	5,68E+07	EA	1,26E+10	DP	4,95E+31	CCG
12,5	15	22	8,57E+05	FCA	4,61E+06	FCC	1,21E+07	EI	5,78E+07	EA	5,47E+09	DP	6,08E+31	CCG
12,5	15	20	7,71E+05	FCA	3,75E+06	FCC	1,24E+07	EI	5,89E+07	EA	2,26E+09	DP	7,41E+31	CCG
20	15	40	8,84E+06	FCA	1,52E+07	EI	2,51E+07	FCC	7,22E+07	EA	2,80E+13	DP	1,28E+49	CCG
20	15	38	8,49E+06	FCA	1,53E+07	EI	2,16E+07	FCC	7,27E+07	EA	1,61E+13	DP	2,94E+49	CCG
20	15	36	8,17E+06	FCA	1,54E+07	EI	1,86E+07	FCC	7,33E+07	EA	8,80E+12	DP	7,50E+49	CCG
20	15	34	7,56E+06	FCA	1,55E+07	EI	1,60E+07	FCC	7,40E+07	EA	4,97E+12	DP	2,11E+50	CCG
20	15	32	7,28E+06	FCA	1,36E+07	FCC	1,57E+07	EI	7,47E+07	EA	2,69E+12	DP	7,08E+50	CCG
20	15	30	6,75E+06	FCA	1,17E+07	FCC	1,58E+07	EI	7,52E+07	EA	1,40E+12	DP	2,79E+51	CCG
20	15	28	6,26E+06	FCA	9,97E+06	FCC	1,59E+07	EI	7,58E+07	EA	7,61E+11	DP	1,35E+52	CCG
20	15	26	5,61E+06	FCA	8,74E+06	FCC	1,60E+07	EI	7,64E+07	EA	4,03E+11	DP	8,21E+52	CCG
20	15	24	5,23E+06	FCA	7,45E+06	FCC	1,56E+07	EI	7,44E+07	EA	2,21E+11	DP	6,91E+53	CCG
20	15	22	4,70E+06	FCA	6,35E+06	FCC	1,64E+07	EI	7,80E+07	EA	1,13E+11	DP	7,83E+54	CCG
20	15	20	4,10E+06	FCA	5,41E+06	FCC	1,66E+07	EI	7,92E+07	EA	5,99E+10	DP	1,39E+56	CCG

Tabela 20: Análises Mecânicas para Estrutura 1, CD5%

Rev.	Base	Sub-base	1ª Rup.	1ª Rup.	2ª Rup.	2ª Rup.	3ª Rup.	3ª Rup.	4ª Rup.	4ª Rup.	5ª Rup.	5ª Rup.	6ª Rup.	6ª Rup.
cm	cm	cm	N _{crítico}	Tipo										
5	15	40	1,06E+06	FCA	1,94E+06	EI	9,22E+06	EA	2,25E+07	FCC	2,97E+11	DP	2,47E+16	CCG
5	15	38	1,06E+06	FCA	1,96E+06	EI	9,32E+06	EA	1,90E+07	FCC	1,40E+11	DP	2,89E+16	CCG
5	15	36	1,09E+06	FCA	1,98E+06	EI	9,43E+06	EA	1,61E+07	FCC	6,99E+10	DP	3,40E+16	CCG
5	15	34	1,09E+06	FCA	2,01E+06	EI	9,56E+06	EA	1,34E+07	FCC	3,15E+10	DP	4,00E+16	CCG
5	15	32	1,12E+06	FCA	2,04E+06	EI	9,71E+06	EA	1,12E+07	FCC	1,44E+10	DP	4,71E+16	CCG
5	15	30	1,12E+06	FCA	2,08E+06	EI	9,29E+06	FCC	9,89E+06	EA	6,43E+09	DP	5,52E+16	CCG
5	15	28	1,12E+06	FCA	2,12E+06	EI	7,63E+06	FCC	1,01E+07	EA	2,83E+09	DP	6,41E+16	CCG
5	15	26	1,12E+06	FCA	2,17E+06	EI	6,27E+06	FCC	1,04E+07	EA	1,19E+09	DP	7,31E+16	CCG
5	15	24	1,12E+06	FCA	2,24E+06	EI	5,07E+06	FCC	1,07E+07	EA	4,89E+08	DP	8,10E+16	CCG
5	15	22	1,09E+06	FCA	2,32E+06	EI	4,08E+06	FCC	1,11E+07	EA	1,92E+08	DP	8,57E+16	CCG
5	15	20	1,04E+06	FCA	2,42E+06	EI	3,20E+06	FCC	1,15E+07	EA	7,38E+07	DP	8,47E+16	CCG
12,5	15	40	1,23E+06	FCA	5,96E+06	EI	2,47E+07	FCC	2,84E+07	EA	2,00E+12	DP	8,04E+30	CCG
12,5	15	38	1,20E+06	FCA	6,05E+06	EI	2,12E+07	FCC	2,88E+07	EA	1,06E+12	DP	1,01E+31	CCG
12,5	15	36	1,16E+06	FCA	6,15E+06	EI	1,80E+07	FCC	2,93E+07	EA	5,51E+11	DP	1,22E+31	CCG
12,5	15	34	1,13E+06	FCA	6,27E+06	EI	1,54E+07	FCC	2,99E+07	EA	2,80E+11	DP	1,47E+31	CCG
12,5	15	32	1,10E+06	FCA	6,41E+06	EI	1,30E+07	FCC	3,05E+07	EA	1,40E+11	DP	1,78E+31	CCG
12,5	15	30	1,04E+06	FCA	6,57E+06	EI	1,10E+07	FCC	3,13E+07	EA	6,99E+10	DP	2,16E+31	CCG
12,5	15	28	9,82E+05	FCA	6,75E+06	EI	9,29E+06	FCC	3,22E+07	EA	3,31E+10	DP	2,62E+31	CCG
12,5	15	26	9,30E+05	FCA	6,92E+06	EI	7,80E+06	FCC	3,30E+07	EA	1,51E+10	DP	3,15E+31	CCG
12,5	15	24	8,57E+05	FCA	6,55E+06	FCC	7,10E+06	EI	3,38E+07	EA	6,98E+09	DP	3,77E+31	CCG
12,5	15	22	7,92E+05	FCA	5,46E+06	FCC	7,32E+06	EI	3,49E+07	EA	3,05E+09	DP	4,47E+31	CCG
12,5	15	20	6,95E+05	FCA	4,51E+06	FCC	7,58E+06	EI	3,61E+07	EA	1,32E+09	DP	5,24E+31	CCG
20	15	40	8,17E+06	FCA	1,07E+07	EI	2,70E+07	FCC	5,09E+07	EA	1,48E+13	DP	3,90E+49	CCG
20	15	38	7,86E+06	FCA	1,08E+07	EI	2,33E+07	FCC	5,16E+07	EA	8,80E+12	DP	8,85E+49	CCG
20	15	36	7,56E+06	FCA	1,10E+07	EI	2,01E+07	FCC	5,23E+07	EA	4,97E+12	DP	2,29E+50	CCG
20	15	34	7,00E+06	FCA	1,12E+07	EI	1,73E+07	FCC	5,32E+07	EA	2,69E+12	DP	6,70E+50	CCG
20	15	32	6,75E+06	FCA	1,14E+07	EI	1,49E+07	FCC	5,41E+07	EA	1,50E+12	DP	2,27E+51	CCG
20	15	30	6,26E+06	FCA	1,16E+07	EI	1,28E+07	FCC	5,52E+07	EA	8,13E+11	DP	8,89E+51	CCG
20	15	28	5,82E+06	FCA	1,10E+07	FCC	1,18E+07	EI	5,62E+07	EA	4,56E+11	DP	4,38E+52	CCG
20	15	26	5,23E+06	FCA	9,64E+06	FCC	1,20E+07	EI	5,72E+07	EA	2,49E+11	DP	2,76E+53	CCG
20	15	24	4,87E+06	FCA	8,33E+06	FCC	1,06E+07	EI	5,06E+07	EA	1,33E+11	DP	2,19E+54	CCG
20	15	22	4,39E+06	FCA	7,15E+06	FCC	1,25E+07	EI	5,96E+07	EA	7,36E+10	DP	2,59E+55	CCG
20	15	20	3,84E+06	FCA	6,13E+06	FCC	1,29E+07	EI	6,12E+07	EA	3,82E+10	DP	4,45E+56	CCG

Tabela 21: Análises Mecânicas para Estrutura 2, CC5%

Rev.	Base e sub-base	1ª Rup.	1ª Rup.	2ª Rup.	2ª Rup.	3ª Rup.	3ª Rup.	4ª Rup.	4ª Rup.	5ª Rup.	5ª Rup.
cm	cm	N _{crítico}	Tipo								
5	40	6,38E+05	EI	3,04E+06	EA	1,61E+07	FCC	8,11E+09	FCA	2,49E+10	DP
5	42	6,37E+05	EI	3,03E+06	EA	1,94E+07	FCC	1,11E+10	FCA	5,69E+10	DP
5	44	6,36E+05	EI	3,03E+06	EA	2,06E+07	FCC	1,30E+10	FCA	1,19E+11	DP
5	46	6,35E+05	EI	3,02E+06	EA	2,16E+07	FCC	1,54E+10	FCA	2,64E+11	DP
5	48	6,34E+05	EI	3,02E+06	EA	2,26E+07	FCC	2,19E+10	FCA	5,17E+11	DP
5	50	6,33E+05	EI	3,02E+06	EA	2,35E+07	FCC	2,64E+10	FCA	1,06E+12	DP
5	52	6,33E+05	EI	3,01E+06	EA	2,45E+07	FCC	3,20E+10	FCA	2,15E+12	DP
5	54	6,32E+05	EI	3,01E+06	EA	2,54E+07	FCC	3,91E+10	FCA	3,93E+12	DP
5	56	6,32E+05	EI	3,01E+06	EA	2,62E+07	FCC	4,82E+10	FCA	7,45E+12	DP
5	58	6,31E+05	EI	3,01E+06	EA	2,69E+07	FCC	4,82E+10	FCA	1,48E+13	DP
5	60	6,31E+05	EI	3,01E+06	EA	2,77E+07	FCC	6,00E+10	FCA	2,55E+13	DP
12,5	40	3,17E+06	EI	1,51E+07	EA	2,03E+07	FCC	1,55E+09	FCA	7,61E+11	DP
12,5	42	3,16E+06	EI	1,50E+07	EA	2,40E+07	FCC	1,55E+09	FCA	1,50E+12	DP
12,5	44	3,14E+06	EI	1,50E+07	EA	2,49E+07	FCC	1,55E+09	FCA	2,89E+12	DP
12,5	46	3,13E+06	EI	1,49E+07	EA	2,57E+07	FCC	1,36E+09	FCA	5,83E+12	DP
12,5	48	3,12E+06	EI	1,49E+07	EA	2,64E+07	FCC	1,36E+09	FCA	1,14E+13	DP
12,5	50	3,11E+06	EI	1,48E+07	EA	2,72E+07	FCC	1,36E+09	FCA	2,12E+13	DP
12,5	52	3,10E+06	EI	1,48E+07	EA	2,80E+07	FCC	1,36E+09	FCA	3,73E+13	DP
12,5	54	3,10E+06	EI	1,48E+07	EA	2,85E+07	FCC	1,36E+09	FCA	6,80E+13	DP
12,5	56	3,09E+06	EI	1,47E+07	EA	2,91E+07	FCC	1,20E+09	FCA	1,29E+14	DP
12,5	58	3,09E+06	EI	1,47E+07	EA	2,99E+07	FCC	1,20E+09	FCA	2,26E+14	DP
12,5	60	3,08E+06	EI	1,47E+07	EA	3,02E+07	FCC	1,20E+09	FCA	3,65E+14	DP
20	40	7,59E+06	EI	2,34E+07	FCC	3,61E+07	EA	5,93E+09	FCA	1,24E+13	DP
20	42	7,54E+06	EI	2,75E+07	FCC	3,59E+07	EA	5,93E+09	FCA	2,32E+13	DP
20	44	7,50E+06	EI	2,80E+07	FCC	3,57E+07	EA	5,93E+09	FCA	4,54E+13	DP
20	46	7,47E+06	EI	2,88E+07	FCC	3,56E+07	EA	5,93E+09	FCA	8,37E+13	DP
20	48	7,43E+06	EI	2,94E+07	FCC	3,54E+07	EA	6,96E+09	FCA	1,44E+14	DP
20	50	7,38E+06	EI	3,05E+07	FCC	3,52E+07	EA	6,96E+09	FCA	4,67E+14	DP
20	52	7,38E+06	EI	3,05E+07	FCC	3,52E+07	EA	6,96E+09	FCA	4,67E+14	DP
20	54	7,36E+06	EI	3,05E+07	FCC	3,51E+07	EA	6,96E+09	FCA	7,80E+14	DP
20	56	1,95E+07	EI	3,08E+07	FCC	9,29E+07	EA	6,96E+09	FCA	1,34E+15	DP
20	58	7,33E+06	EI	3,14E+07	FCC	3,49E+07	EA	6,96E+09	FCA	2,05E+15	DP
20	60	7,31E+06	EI	3,17E+07	FCC	3,48E+07	EA	6,96E+09	FCA	3,20E+15	DP

Tabela 22: Análises Mecânicas para Estrutura 2, CD5%

Rev.	Base e sub-base	1ª Rup.	1ª Rup.	2ª Rup.	2ª Rup.	3ª Rup.	3ª Rup.	4ª Rup.	4ª Rup.	5ª Rup.	5ª Rup.
cm	cm	N _{crítico}	Tipo								
5	40	3,97E+04	EI	1,89E+05	EA	1,84E+07	FCC	7,00E+09	FCA	1,11E+10	DP
5	42	3,95E+04	EI	1,88E+05	EA	2,21E+07	FCC	8,11E+09	FCA	2,37E+10	DP
5	44	3,94E+04	EI	1,88E+05	EA	2,31E+07	FCC	9,45E+09	FCA	5,15E+10	DP
5	46	3,93E+04	EI	1,87E+05	EA	2,41E+07	FCC	1,30E+10	FCA	1,07E+11	DP
5	48	3,92E+04	EI	1,87E+05	EA	2,52E+07	FCC	1,54E+10	FCA	2,21E+11	DP
5	50	3,91E+04	EI	1,86E+05	EA	2,59E+07	FCC	1,83E+10	FCA	4,28E+11	DP
5	52	3,90E+04	EI	1,86E+05	EA	2,69E+07	FCC	2,19E+10	FCA	8,69E+11	DP
5	54	3,90E+04	EI	1,86E+05	EA	2,75E+07	FCC	2,64E+10	FCA	1,61E+12	DP
5	56	3,89E+04	EI	1,85E+05	EA	2,83E+07	FCC	3,20E+10	FCA	3,12E+12	DP
5	58	3,89E+04	EI	1,85E+05	EA	2,89E+07	FCC	3,91E+10	FCA	5,83E+12	DP
5	60	3,88E+04	EI	1,85E+05	EA	2,96E+07	FCC	3,91E+10	FCA	1,04E+13	DP
12,5	40	7,36E+05	EI	3,51E+06	EA	2,25E+07	FCC	5,99E+08	FCA	3,35E+11	DP
12,5	42	7,29E+05	EI	3,47E+06	EA	2,63E+07	FCC	5,99E+08	FCA	6,68E+11	DP
12,5	44	7,24E+05	EI	3,45E+06	EA	2,71E+07	FCC	5,99E+08	FCA	1,31E+12	DP
12,5	46	7,19E+05	EI	3,42E+06	EA	2,79E+07	FCC	5,99E+08	FCA	2,49E+12	DP
12,5	48	7,14E+05	EI	3,40E+06	EA	2,87E+07	FCC	5,99E+08	FCA	4,97E+12	DP
12,5	50	7,11E+05	EI	3,39E+06	EA	2,94E+07	FCC	5,99E+08	FCA	8,80E+12	DP
12,5	52	7,07E+05	EI	3,37E+06	EA	3,00E+07	FCC	5,39E+08	FCA	1,61E+13	DP
12,5	54	7,05E+05	EI	3,36E+06	EA	3,05E+07	FCC	5,39E+08	FCA	3,08E+13	DP
12,5	56	7,02E+05	EI	3,34E+06	EA	3,11E+07	FCC	5,39E+08	FCA	5,54E+13	DP
12,5	58	7,00E+05	EI	3,33E+06	EA	3,16E+07	FCC	5,39E+08	FCA	9,31E+13	DP
12,5	60	6,98E+05	EI	3,32E+06	EA	3,20E+07	FCC	5,39E+08	FCA	1,61E+14	DP
20	40	3,32E+06	EI	1,58E+07	EA	2,54E+07	FCC	2,51E+09	FCA	5,83E+12	DP
20	42	3,28E+06	EI	1,56E+07	EA	2,96E+07	FCC	2,86E+09	FCA	1,14E+13	DP
20	44	3,25E+06	EI	1,55E+07	EA	3,02E+07	FCC	2,86E+09	FCA	2,12E+13	DP
20	46	3,23E+06	EI	1,54E+07	EA	3,07E+07	FCC	2,86E+09	FCA	3,73E+13	DP
20	48	3,20E+06	EI	1,53E+07	EA	3,14E+07	FCC	3,29E+09	FCA	6,80E+13	DP
20	50	3,16E+06	EI	1,51E+07	EA	3,23E+07	FCC	3,29E+09	FCA	2,02E+14	DP
20	52	3,16E+06	EI	1,51E+07	EA	3,23E+07	FCC	3,29E+09	FCA	2,02E+14	DP
20	54	3,15E+06	EI	1,50E+07	EA	3,23E+07	FCC	3,29E+09	FCA	3,65E+14	DP
20	56	1,58E+07	EI	3,28E+07	FCC	7,50E+07	EA	3,29E+09	FCA	6,01E+14	DP
20	58	3,12E+06	EI	1,49E+07	EA	3,30E+07	FCC	3,29E+09	FCA	1,02E+15	DP
20	60	3,11E+06	EI	1,48E+07	EA	3,35E+07	FCC	3,29E+09	FCA	1,54E+15	DP

Tabela 23: Análises Mecânicas para Estrutura 3, CC5%

Rev.	Base	Sub-base	1ª Rup.	1ª Rup.	2ª Rup.	2ª Rup.	3ª Rup.	3ª Rup.	4ª Rup.	4ª Rup.	5ª Rup.	5ª Rup.	6ª Rup.	6ª Rup.
cm	cm	cm	N _{crítico}	Tipo										
5	20	15	1,23E+06	FCC	1,91E+07	EI	4,66E+07	DP	9,09E+07	EA	6,92E+08	FCA	4,05E+11	CCG
5	22	15	1,50E+06	FCC	1,96E+07	EI	9,33E+07	EA	1,82E+08	DP	8,37E+08	FCA	5,67E+11	CCG
5	24	15	1,76E+06	FCC	2,00E+07	EI	9,54E+07	EA	6,52E+08	DP	1,13E+09	FCA	7,64E+11	CCG
5	26	15	2,06E+06	FCC	2,04E+07	EI	9,72E+07	EA	1,39E+09	FCA	2,35E+09	DP	9,89E+11	CCG
5	28	15	2,33E+06	FCC	2,08E+07	EI	9,89E+07	EA	1,73E+09	FCA	7,90E+09	DP	1,23E+12	CCG
5	30	15	2,60E+06	FCC	2,11E+07	EI	1,00E+08	EA	2,17E+09	FCA	2,49E+10	DP	1,48E+12	CCG
5	32	15	2,89E+06	FCC	2,13E+07	EI	1,02E+08	EA	2,75E+09	FCA	7,76E+10	DP	1,74E+12	CCG
5	34	15	3,12E+06	FCC	2,16E+07	EI	1,03E+08	EA	3,53E+09	FCA	2,34E+11	DP	1,98E+12	CCG
5	36	15	3,37E+06	FCC	2,18E+07	EI	1,04E+08	EA	4,59E+09	FCA	6,68E+11	DP	2,21E+12	CCG
5	38	15	3,60E+06	FCC	2,19E+07	EI	1,05E+08	EA	6,06E+09	FCA	1,86E+12	DP	2,43E+12	CCG
5	40	15	3,82E+06	FCC	2,21E+07	EI	1,05E+08	EA	8,11E+09	FCA	2,63E+12	CCG	4,97E+12	DP
12,5	20	15	2,38E+06	FCC	2,08E+07	EI	2,74E+07	CCG	9,93E+07	EA	5,39E+08	FCA	1,11E+10	DP
12,5	22	15	2,67E+06	FCC	2,11E+07	EI	1,01E+08	EA	1,33E+08	CCG	7,46E+08	FCA	3,64E+10	DP
12,5	24	15	2,94E+06	FCC	2,14E+07	EI	1,02E+08	EA	4,33E+08	CCG	9,39E+08	FCA	1,13E+11	DP
12,5	26	15	3,21E+06	FCC	2,16E+07	EI	1,03E+08	EA	1,04E+09	CCG	1,06E+09	FCA	3,35E+11	DP
12,5	28	15	3,43E+06	FCC	2,18E+07	EI	1,04E+08	EA	1,20E+09	FCA	1,97E+09	CCG	9,94E+11	DP
12,5	30	15	3,67E+06	FCC	2,20E+07	EI	1,05E+08	EA	1,36E+09	FCA	3,13E+09	CCG	2,89E+12	DP
12,5	32	15	3,86E+06	FCC	2,22E+07	EI	1,06E+08	EA	1,55E+09	FCA	4,32E+09	CCG	8,09E+12	DP
12,5	34	15	4,05E+06	FCC	2,23E+07	EI	1,06E+08	EA	1,55E+09	FCA	5,36E+09	CCG	2,12E+13	DP
12,5	36	15	4,25E+06	FCC	2,25E+07	EI	1,07E+08	EA	1,55E+09	FCA	6,13E+09	CCG	5,54E+13	DP
12,5	38	15	4,41E+06	FCC	2,26E+07	EI	1,08E+08	EA	1,55E+09	FCA	6,59E+09	CCG	1,29E+14	DP
12,5	40	15	4,59E+06	FCC	2,27E+07	EI	1,08E+08	EA	1,55E+09	FCA	6,75E+09	CCG	3,23E+14	DP
20	20	15	3,10E+05	CCG	3,47E+06	FCC	2,19E+07	EI	1,04E+08	EA	1,08E+09	FCA	1,22E+12	DP
20	22	15	3,62E+06	CCG	3,71E+06	FCC	2,21E+07	EI	1,05E+08	EA	1,52E+09	FCA	3,37E+12	DP
20	24	15	3,89E+06	FCC	2,22E+07	EI	2,79E+07	CCG	1,06E+08	EA	1,94E+09	FCA	9,58E+12	DP
20	26	15	4,09E+06	FCC	2,24E+07	EI	1,07E+08	EA	1,52E+08	CCG	2,51E+09	FCA	2,32E+13	DP
20	28	15	4,29E+06	FCC	2,25E+07	EI	1,07E+08	EA	6,16E+08	CCG	2,86E+09	FCA	6,13E+13	DP
20	30	15	4,46E+06	FCC	2,26E+07	EI	1,08E+08	EA	1,96E+09	CCG	3,29E+09	FCA	1,61E+14	DP
20	32	15	4,59E+06	FCC	2,27E+07	EI	1,08E+08	EA	3,78E+09	FCA	4,98E+09	CCG	4,12E+14	DP
20	34	15	4,59E+06	FCC	2,28E+07	EI	1,09E+08	EA	4,37E+09	FCA	1,04E+10	CCG	8,90E+14	DP
20	36	15	4,77E+06	FCC	1,82E+07	EI	8,69E+07	EA	5,08E+09	FCA	1,90E+10	CCG	2,37E+15	DP
20	38	15	4,91E+06	FCC	2,30E+07	EI	1,09E+08	EA	5,08E+09	FCA	3,12E+10	CCG	5,09E+15	DP
20	40	15	5,00E+06	FCC	2,31E+07	EI	1,10E+08	EA	5,93E+09	FCA	4,68E+10	CCG	1,16E+16	DP

Tabela 24: Análises Mecânicas para Estrutura 3, CD5%

Rev.	Base	Sub-base	1ª Rup.	1ª Rup.	2ª Rup.	2ª Rup.	3ª Rup.	3ª Rup.	4ª Rup.	4ª Rup.	5ª Rup.	5ª Rup.	6ª Rup.	6ª Rup.
cm	cm	cm	N _{crítico}	Tipo										
5	20	15	1,85E+06	FCC	1,48E+07	EI	1,97E+07	DP	7,05E+07	EA	9,22E+08	FCA	1,88E+12	CCG
5	22	15	1,98E+06	FCC	1,61E+07	EI	7,68E+07	EA	9,11E+07	DP	9,22E+08	FCA	1,88E+12	CCG
5	24	15	2,27E+06	FCC	1,68E+07	EI	8,01E+07	EA	3,17E+08	DP	1,13E+09	FCA	2,55E+12	CCG
5	26	15	2,54E+06	FCC	1,74E+07	EI	8,30E+07	EA	1,07E+09	DP	1,39E+09	FCA	3,32E+12	CCG
5	28	15	2,81E+06	FCC	1,80E+07	EI	8,56E+07	EA	1,73E+09	FCA	3,55E+09	DP	4,16E+12	CCG
5	30	15	3,09E+06	FCC	1,85E+07	EI	8,80E+07	EA	2,17E+09	FCA	1,11E+10	DP	5,05E+12	CCG
5	32	15	3,35E+06	FCC	1,89E+07	EI	9,00E+07	EA	2,44E+09	FCA	3,31E+10	DP	5,94E+12	CCG
5	34	15	3,60E+06	FCC	1,93E+07	EI	9,19E+07	EA	3,11E+09	FCA	9,58E+10	DP	6,81E+12	CCG
5	36	15	3,82E+06	FCC	1,96E+07	EI	9,36E+07	EA	4,02E+09	FCA	2,64E+11	DP	7,65E+12	CCG
5	38	15	4,02E+06	FCC	2,00E+07	EI	9,51E+07	EA	5,26E+09	FCA	7,13E+11	DP	8,44E+12	CCG
5	40	15	4,20E+06	FCC	2,03E+07	EI	9,65E+07	EA	6,06E+09	FCA	1,86E+12	DP	9,16E+12	CCG
12,5	20	15	2,89E+06	FCC	5,00E+06	CCG	1,82E+07	EI	8,67E+07	EA	2,09E+08	FCA	5,47E+09	DP
12,5	22	15	3,18E+06	FCC	1,87E+07	EI	2,37E+07	CCG	8,90E+07	EA	2,72E+08	FCA	1,72E+10	DP
12,5	24	15	3,45E+06	FCC	1,91E+07	EI	7,83E+07	CCG	9,10E+07	EA	3,27E+08	FCA	5,15E+10	DP
12,5	26	15	3,68E+06	FCC	1,95E+07	EI	9,29E+07	EA	1,95E+08	CCG	3,97E+08	FCA	1,57E+11	DP
12,5	28	15	3,87E+06	FCC	1,98E+07	EI	9,45E+07	EA	3,90E+08	CCG	4,39E+08	FCA	4,28E+11	DP
12,5	30	15	4,11E+06	FCC	2,01E+07	EI	9,60E+07	EA	4,85E+08	FCA	6,56E+08	CCG	1,22E+12	DP
12,5	32	15	4,29E+06	FCC	2,04E+07	EI	9,73E+07	EA	5,39E+08	FCA	9,66E+08	CCG	3,37E+12	DP
12,5	34	15	4,48E+06	FCC	2,07E+07	EI	9,85E+07	EA	5,99E+08	FCA	1,28E+09	CCG	8,09E+12	DP
12,5	36	15	4,62E+06	FCC	2,09E+07	EI	9,96E+07	EA	5,99E+08	FCA	1,56E+09	CCG	2,12E+13	DP
12,5	38	15	4,79E+06	FCC	2,11E+07	EI	1,01E+08	EA	5,99E+08	FCA	1,79E+09	CCG	5,01E+13	DP
12,5	40	15	4,93E+06	FCC	2,13E+07	EI	1,02E+08	EA	5,99E+08	FCA	1,96E+09	CCG	1,29E+14	DP
20	20	15	1,74E+05	CCG	3,96E+06	FCC	1,99E+07	EI	9,50E+07	EA	5,31E+08	FCA	5,87E+11	DP
20	22	15	1,81E+06	CCG	4,17E+06	FCC	2,02E+07	EI	9,64E+07	EA	7,12E+08	FCA	1,61E+12	DP
20	24	15	4,35E+06	FCC	1,28E+07	CCG	2,05E+07	EI	9,77E+07	EA	8,74E+08	FCA	4,25E+12	DP
20	26	15	4,52E+06	FCC	2,08E+07	EI	6,62E+07	CCG	9,89E+07	EA	1,08E+09	FCA	1,14E+13	DP
20	28	15	4,68E+06	FCC	2,10E+07	EI	1,00E+08	EA	2,61E+08	CCG	1,36E+09	FCA	2,80E+13	DP
20	30	15	4,82E+06	FCC	2,12E+07	EI	1,01E+08	EA	8,22E+08	CCG	1,52E+09	FCA	6,80E+13	DP
20	32	15	4,97E+06	FCC	2,14E+07	EI	1,02E+08	EA	1,94E+09	FCA	2,14E+09	CCG	1,61E+14	DP
20	34	15	4,97E+06	FCC	2,15E+07	EI	1,03E+08	EA	1,94E+09	FCA	4,75E+09	CCG	3,65E+14	DP
20	36	15	5,11E+06	FCC	1,38E+07	EI	6,58E+07	EA	2,20E+09	FCA	9,00E+09	CCG	8,90E+14	DP
20	38	15	5,23E+06	FCC	2,18E+07	EI	1,04E+08	EA	2,51E+09	FCA	1,52E+10	CCG	2,05E+15	DP
20	40	15	5,34E+06	FCC	2,20E+07	EI	1,05E+08	EA	2,51E+09	FCA	2,34E+10	CCG	4,35E+15	DP