



RUBENS GUILHERME BOAVENTURA SILVA

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO DE LAVRAS/MG COM
ADIÇÃO DE CAL PARA APLICAÇÃO EM ESTRADAS
VICINAIS**

LAVRAS – MG

2019

RUBENS GUILHERME BOAVENTURA SILVA

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO DE LAVRAS/MG COM ADIÇÃO DE CAL PARA
APLICAÇÃO EM ESTRADAS VICINAIS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro
Orientador

LAVRAS – MG
2019

RUBENS GUILHERME BOAVENTURA SILVA

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO DE LAVRAS/MG COM ADIÇÃO DE CAL PARA
APLICAÇÃO EM ESTRADAS VICINAIS
LAVRAS/MG'S SOIL STABILIZATION WITH LIME FOR APPLICATION ON DIRT
ROADS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 03 de julho de 2019.

Prof. Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro UFLA
Prof. M.^c Eduardo Souza Cândido UFLA
Prof.^a M.^a Raquel Mariano Linhares UFLA



Prof. Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro
Orientador

**LAVRAS – MG
2019**

*Aos meus pais, Maria Olésia e Sandro Fernando, pelos esforços e sacrifícios em prol da minha
formação acadêmica, dedico.*

AGRADECIMENTOS

À minha família, primeiramente: Sandro Fernando e Maria Olésia, pais, pelo imensurável amor, amparo, encorajamento, apoio financeiro, esforços e sacrifícios realizados em prol de minha educação; e Andreza, irmã, pela compreensão nos momentos em que, distante de casa, deixei de compartilhar com você nesta etapa da sua vida.

Ao Programa Institucional Voluntário de Iniciação Científica - PIVIC/UFLA, pela oportunidade de pesquisa e contribuição acadêmica; e à Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Engenharia, à Coordenação e aos professores do Núcleo de Engenharia Civil, pela formação concedida.

Ao conterrâneo professor Dr. André Geraldo Ribeiro Cornélio, pela orientação, dedicação, conhecimentos transmitidos, confiança, prontidão e paciência durante todo o decorrer deste trabalho; ao professor M.^e Eduardo Souza Cândido, pela colaboração prestada, incentivo e profissionalismo.

À técnica dos laboratórios do Núcleo de Engenharia Ambiental e Sanitária, Juliana Giacoppo, e à técnica dos laboratórios de Engenharia de Materiais, Poliana Machado, pelos auxílios operacionais; à colega de laboratório e curso Ana Flávia Duarte, pela companhia e bom humor contagiante, que em muito suavizaram a execução dos ensaios geotécnicos; e ao professor Dr. Rodrigo Allan Pereira, responsável pelo Laboratório de Materiais e Mecânica das Estruturas, pela assistência nos ensaios mecânicos.

Ao grande amigo e colega de apartamento Matheus Basílio, pelo indescritível companheirismo, estímulo aos estudos e, principalmente, incondicional exemplo pessoal; aos amigos Fabrício Magalhães, Fernanda Vilela, Willian Souza e Lucas Bastos, pela presença em minha vida e preciosos momentos de descontração e descanso no desdobrar não só deste trabalho, mas também da graduação; e aos amigos e colegas de república André Salomão, Vitor Fernandes, Gábrio Mesquita e Lucas Boldrin, pelo acolhimento mútuo na cidade universitária e incríveis três anos de convivência.

Àqueles que, por ventura, esqueci de mencionar e contribuíram, direta ou indiretamente, na elaboração desta monografia.

RESUMO

As estradas vicinais ou não pavimentadas da Universidade Federal de Lavras costumam apresentar contínuos desníveis e pontos de empoçamento devido às intempéries e ao tráfego trucado interno de silagem e produção agrícola. Exigências anuais de manutenção tornam projetos geotécnicos de melhoramento e estabilização do solo local alternativas viáveis e atrativas. O objetivo deste trabalho é, então, o estudo de viabilidade do uso da cal como estabilizante químico de um solo ocorrente em Lavras/MG para aplicação em camadas estruturais de estradas vicinais, visando melhorias de resistência, redução da frequência de reparos e a consequente economia dos cofres públicos. Realizaram-se, para tal, ensaios iniciais de caracterização, dosagem e compactação, cujo solo A-7-5 (classificação HBR), com textura predominantemente fina e plasticidade média, apresentou características propícias à estabilização em baixas quantidades de cal tipo CH-I. A confecção dos corpos de prova, demandada pelo ensaio mecânico, envolveu misturas com teores de cal de 2, 4 e 6%, adaptação de um sistema para moldagem e compactações no ponto máximo da curva. Posteriores ensaios de compressão simples indicaram acréscimos significativos de resistência de até 128% com a adição do estabilizante, valor inferido maior caso houvesse melhor controle das variáveis envolvidas. A análise detalhada dos resultados possibilitou a verificação de eficácia do solo-cal em detrimento do natural e a obtenção de parâmetros ótimos de mistura, cuja dosagem de 4%, além de considerada econômica, pode garantir a estabilização do solo estudado.

Palavras-chave: Estabilizante. Resistência. Camadas estruturais.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fluxograma da estruturação adotada para o trabalho.	11
Figura 2.1 – Efeito do teor de cal sobre a resistência à compressão simples para misturas solo-cal curadas por 7 dias.	21
Figura 2.2 – Dupla camada difusa.	24
Figura 2.3 – Efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para misturas solo-cal.	26
Figura 2.4 – Execução do trecho de acesso ao distrito de Flores (Russas/CE).	29
Figura 2.5 – Maquinários adequados para o processo de estabilização <i>in situ</i>	30
Figura 3.1 – Situação da jazida na Universidade Federal de Lavras.	32
Figura 3.2 – Situação da jazida no mapeamento de classes de solo do município de Lavras/MG.	33
Figura 3.3 – Solo de estudo.	34
Figura 3.4 – Fluxograma simplificado do programa metodológico adotado.	35
Figura 3.5 – Metodologia experimental de dosagem por pH.	36
Figura 3.6 – Moldagem dos corpos de prova para ensaio à compressão simples.	39
Figura 3.7 – Esquema de funcionamento do sistema compactador adaptado.	40
Figura 3.8 – Acondicionamento dos corpos de prova de solo e solo-cal.	41
Figura 3.9 – Execução do ensaio de resistência à compressão simples.	41
Figura 4.1 – Curva granulométrica.	44
Figura 4.2 – Curvas de compactação e saturação do solo natural.	45
Figura 4.3 – Variação do pH com a adição de cal.	46
Figura 4.4 – Curvas de compactação das misturas solo-cal.	47
Figura 4.5 – Situação dos pontos de moldagem dos CPs nas curvas de compactação.	48
Figura 4.6 – Retenção de massa da mistura na compactação dos corpos de prova.	49
Figura 4.7 – Resistência à compressão simples do solo natural e das misturas solo-cal moldados a nível ótimo de compactação e curados por 14 dias.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição média das cales comercializadas no mercado brasileiro.	16
Tabela 2.2 – Classificações das dimensões das partículas de solo propostas por duas instituições.	18
Tabela 2.3 – Características de compactação e resistência à compressão simples de misturas solo-cal encontradas por Lovato (2004).	21
Tabela 3.1 – Composição granulométrica e características de compactação de solos típicos do município de Lavras/MG.	38
Tabela 4.1 – Caracterização geotécnica do solo natural.	43
Tabela 4.2 – Características de compactação do solo natural e das misturas solo-cal. . .	47
Tabela 4.3 – Resistência à compressão simples do solo natural e das misturas solo-cal moldados a nível ótimo de compactação e curados por 14 dias.	49
Tabela 4.4 – Parâmetros ótimos de dosagem e compactação determinados para possível aplicação em estradas vicinais de Lavras/MG.	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Classificação de solos da Highway Research Board - HRB.	19
Quadro 2.2 – Critério de escolha do estabilizante mais efetivo.	20
Quadro 2.3 – Situações de uso do método de estabilização de solo com cal.	22
Quadro 2.4 – Estradas brasileiras com uso de solo-cal em camadas estruturais.	29
Quadro 3.1 – Procedimentos geotécnicos laboratoriais de caracterização.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a.C.	Antes de Cristo
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADUFLA	Seção Sindical dos Docentes da Universidade Federal de Lavras
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP(s)	Corpo(s) de prova
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
ETA	Estação de tratamento de água
GC	Grau de compactação
HRB	Highway Research Board
IG	Índice de grupo
IP	Índice de plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LC	Limite de contração
LFP	Lime Fixation Point
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
NBR	Norma Brasileira
NLA	National Lime Association
pH	Potencial hidrogeniônico
PROINFRA	Pró-Reitoria de Infraestrutura e Logística
PVC	Policloreto de vinila
RCS	Resistência à compressão simples
SGM	Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TRB	Transportation Research Board
UFLA	Universidade Federal de Lavras
UTM	Universal Transversa de Mercator

LISTA DE SÍMBOLOS

$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	Carbonatos de cálcio e de magnésio
CaO	Óxido de cálcio ou cal virgem cálcica
$\text{CaO} \cdot \text{MgO}$	Cal virgem dolomítica
Ca(OH)_2	Hidróxido de cálcio ou cal hidratada cálcica
$\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{MgO}$	Cal mono-hidratada dolomítica
$\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{Mg(OH)}_2$	Cal di-hidratada dolomítica
MgO	Óxido de magnésio
Fe_2O_3	Óxido de ferro III
Al_2O_3	Óxido de alumínio
SO_3	Trióxido de enxofre
A	Índice de atividade superficial de Skempton
F_{200}	Porcentagem passante na peneira n.º 200
Fe^{2+}	Íon cátion bivalente de ferro
$\rho_{d,max}$	Massa específica aparente seca máxima
w_{ot}	Teor de umidade ótimo
Ca^{2+}	Íon cátion bivalente de cálcio
$\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Silicato de cálcio hidratado
CO_2	Dióxido de carbono ou gás carbônico
Mg^{2+}	Íon cátion bivalente de magnésio
CaCO_3	Carbonato de cálcio
MgCO_3	Carbonato de magnésio
Al^{3+}	Íon cátion trivalente de alumínio
K^+	Íon cátion monovalente de potássio
Na^+	Íon cátion monovalente de sódio
ρ_s	Massa específica dos grãos de solo
C_u	Coefficiente de uniformidade granulométrica
C_c	Coefficiente de curvatura granulométrica
D	Diâmetro do CP cilíndrico de solo ou solo-cal
h	Altura do CP cilíndrico de solo ou solo-cal
$\%_{cal}$	Teor de cal
m_s	Massa de solo seco necessária na moldagem de um CP cilíndrico

m_c	Massa de cal necessária na moldagem de um CP cilíndrico
m_w	Massa de água necessária na moldagem de um CP cilíndrico
π	Constante matemática = 3,14159265...
w	Teor de umidade
ρ_d	Massa específica aparente seca
R^2	Coefficiente de determinação do ajustamento estatístico
Sr	Grau de saturação
$\% / \%_{cal}$	Acréscimo percentual de RCS por teor de cal acrescido à mistura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Contextualização	9
1.2	Objetivos	10
1.3	Organização do trabalho	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Estabilização de solos	12
2.2	Tipos de estabilização de solos	13
2.3	Estabilização de solo com cal	14
2.3.1	A cal como estabilizante	14
2.3.2	Solo e modificações com a adição de cal	17
2.3.3	Solo-cal e estabilização	22
2.3.4	Fatores que influenciam as reações solo-cal	25
2.3.5	Métodos de dosagem	27
2.4	Estabilização de solo com cal para uso em estradas	28
3	MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1	Solo	32
3.2	Cal	34
3.3	Água	35
3.4	Procedimento metodológico	35
3.4.1	Estimativa da dosagem	35
3.4.2	Ensaio de caracterização geotécnica	36
3.4.3	Confecção dos corpos de prova para ensaio mecânico	37
3.4.4	Ensaio de resistência à compressão simples	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	Caracterização geotécnica do solo natural	43
4.2	Dosagem	45
4.3	Compactação das misturas solo-cal	46
4.4	Resistência à compressão simples	48
4.5	Parâmetros ótimos de dosagem e compactação	51
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
5.1	Conclusões	53

5.2	Sugestões para trabalhos futuros	53
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O modal rodoviário brasileiro apresenta-se como o majoritário e mais desenvolvido transporte de pessoas e cargas, com uma malha próxima de 1,72 milhão de quilômetros em extensão (CNT, 2017). Com ocorrência de cerca de 83% das rodovias, estradas vicinais de terra têm importâncias socioeconômicas significativas às comunidades rurais: desenvolvimento agrário, provisão de serviços de saúde, acesso à educação e à comunicação e, também, distribuição de mercadorias (NUNES, 2003). Nesta última, intermedeiam o escoamento da produção entre as propriedades agrícolas e/ou industriais e as grandes rodovias pavimentadas, nas quais desloca-se até o destino final.

A eficiência deste serviço é, entretanto, questionável, já que as estradas dispõem de infraestrutura inadequada, visível em vias deficitárias (com ondulações, atoleiros, buracos etc.) cuja construção não considera fatores prejudiciais à estrutura, tais como tráfego, chuvas ou tipo de solo. Este último relaciona-se à variabilidade do leito, normalmente obtido no próprio local de construção, que, muitas vezes, não apresenta capacidade de suporte, condições de rolamento e drenagem compatíveis. A ausência dessas características geotécnicas em estradas de terra pode, conseqüentemente, retardar o deslocamento de bens, serviços e pessoas, havendo necessidade de implementações de programas de manutenções regulares e preventivas, com custos bastante elevados (NUNES, 2003; MARIOTINI, 1987 apud NUNES, 2003).

Um problema similar mostra-se recorrente na Universidade Federal de Lavras. A Pró-Reitoria de Infraestrutura e Logística - PROINFRA relata serem necessárias realizações anuais de manutenções de nivelamento e reparos, comumente no mês de maio, nas estradas de terra internas. Crê-se que a ação veicular, as chuvas, o deslocamento de 14 m³ de produção de selagem (cerca de 30 toneladas) em caminhões trucados e o escoamento de produção agrícola de suas fazendas provoquem nas camadas de superfície desníveis e empoçamentos. O setor reconhece, ainda, os pontos de ocorrência do problema. Alguns deles são a “Entrada das Lagoas”, as proximidades da Represa do Departamento de Medicina Veterinária e também da Represa do Departamento de Zootecnia, a “curva do bambuzal”, a divisa com a sede da Seção Sindical dos Docentes - ADUFLA e próximo ao eucalipto da Represa do Pomar. Entre esta e a Estação

de Tratamento, há uma grande área crítica, que requer sinalização ou inibição de tráfego em chuvas intensas (informação verbal)¹.

A busca por soluções viáveis à questão, capazes de gerar economia às receitas federais, faz-se, então, relevante. A utilização de estabilizantes químicos, como a cal, adéqua-se à problemática. Quando inseridas às camadas naturais, cales podem incrementar várias propriedades de interesse à execução de estradas: aumento de resistência mecânica, redução da plasticidade e da expansão, entre outras, e por isto são vistas em correções de bases e sub-bases (ARAÚJO, 2009). A possível aplicação deste material em camadas de estradas não pavimentadas, visando melhorias geotécnicas e redução da frequência de manutenções, é objeto de estudo do presente trabalho e será avaliada por meio de ensaios laboratoriais.

1.2 Objetivos

Constitui-se como objetivo principal deste trabalho a análise da viabilidade técnica da estabilização de um solo do município de Lavras/MG mediante adição de cal. Os objetivos específicos, almejados para que o principal seja atingido, também são listados:

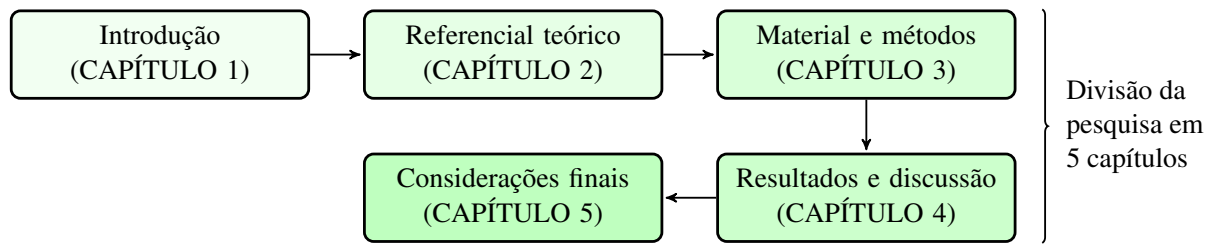
- Caracterização física e mecânica de um solo de Lavras/MG;
- Avaliação do efeito de diferentes dosagens de cal nas propriedades mecânicas de um solo de Lavras/MG;
- Investigação de um teor ótimo, em peso, de cal que promova a estabilização do solo de Lavras/MG;
- Avaliação do método de estabilização química de solo com cal para aplicação na malha viária vicinal interna à UFLA.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos (FIGURA 1.1), incluso este, introdutório, que expõe a importância e a aplicação prática do tema proposto, os objetivos almejados pela pesquisa, bem como sua estruturação.

¹ Fala do pró-reitor de Infraestrutura e Logística da Universidade Federal de Lavras, em conversa no dia 14 de março de 2019.

Figura 1.1 – Fluxograma da estruturação adotada para o trabalho.



Fonte: Do autor (2019).

No Capítulo 2 é apresentado o embasamento teórico do trabalho, referente às áreas temáticas de interesse. Abordam-se conhecimentos bibliográficos relativos à estabilização de solos e, em particular, à técnica e às reações estabilizantes solo-cal, às características das cales, aos solos mais adequados para tal, aos métodos de dosagem, bem como à prática profissional de aplicação em camadas de estradas.

O Capítulo 3 dispõe da identificação, das características e dos critérios de escolha dos materiais empregados nos estudos, bem como de uma breve descrição metodológica dos ensaios laboratoriais realizados, adotados conforme a revisão bibliográfica realizada (CAPÍTULO 2) e a disponibilidade de aparelhagem necessária.

No Capítulo 4, apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais realizados com a amostra de solo coletado na Universidade Federal de Lavras e sua mistura com cal, cujas metodologias foram descritas no Capítulo 3, com a finalidade de se obter parâmetros ótimos de estabilização química.

São evidenciadas no Capítulo 5 as conclusões referentes à aplicação do programa metodológico proposto para o estudo da estabilização do solo com uso de cal, e também sugestões de trabalhos futuros, que vinculam-se às limitações encontradas e às potencialidades de pesquisas científicas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Estabilização de solos

Solos são amplamente utilizados em obras de engenharia civil devido à ocorrência universal e ao baixo custo, mesmo ao apresentarem-se como insumos complexos ou variarem com a localização (NÚÑEZ, 1991). Dentre inúmeras aplicações, desempenham funções ora de sustentação, como fundações ou bases, ora de materiais de construção, sejam em tijolos, aterros, barragens etc., devendo apresentar, para tais, propriedades relacionadas. Solos argilosos, por exemplo, não costumam apresentar estabilidade volumétrica, resistência e durabilidade, e uma alternativa para possibilitar seu uso é estabilizá-lo (FERREIRA; FALEIRO; FREIRE, 2005).

O termo “estabilização”, relativo ao nome, refere-se aos processos de natureza física, físico-química ou mecânica que promovam a estabilidade do solo para os limites de sua utilização e a garantam sob ações de cargas externas ou ações climáticas variáveis (BAPTISTA, 1976 apud BARBOSA, 2013).

Como o solo de dada região pode não atender, parcial ou inteiramente, aos requisitos construtivos necessários, dada a variabilidade com a localização, Ingles e Metcalf (1972) propõem duas outras alternativas geotécnicas que não estabilizá-lo *in loco*: aceitar o material local e projetar para os padrões restritos à qualidade existente, ou removê-lo e repor um com propriedades superiores.

Estas podem acarretar significativos aumentos no custo da obra ao descartarem o trabalho com solo existente, requerendo intensa movimentação de terra, ou ao restringirem a liberdade construtiva nos quesitos funcionalidade, segurança ou estética. Solos que não se enquadram nas especificações de projeto ou encontram-se em péssimas condições, então, tornam a estabilização uma opção bastante atrativa na demanda de empreendimentos (SOUZA; CASTOR, 2016).

A economia não se apresenta apenas na racionalização do material e padronização de projetos. O domínio dessa técnica também reduz sensivelmente o tempo de execução de obras, que viabiliza a industrialização do processo construtivo (PESSOA, 2004).

A definição de estabilização difere para alguns autores, que adicionam informações sobre as propriedades do solo. Em seus estudos sobre pavimentação, Vogt (1971 apud PEREIRA, 2012) a descreve como um método utilizado no material com a finalidade de aumentar sua re-

sistência, para que resista aos esforços do tráfego e o torne mais durável sob os efeitos das intempéries.

Outros, por sua vez, optam distingui-la de “melhoramento” de solos. Little e Nair (2009) definem melhoramento como a modificação ocorrida em curto prazo (durante, logo ou horas após a mistura), enquanto estabilização em geral refere-se às reações de longo prazo. Já para Oliveira (2010), os processos de estabilização englobam a melhoria ou a estabilidade das propriedades permeabilidade, deformabilidade e resistência, diferente dos solos melhorados, cujos processos não enfocam esta última. Isto é, melhoramento de solos não intenciona ganhos significativos de resistência.

Alterações nas propriedades citadas, como aumento de resistência e menor sensibilização desta à umidade, diminuição da deformabilidade e também da permeabilidade, costumam ser almejadas por engenheiros rodoviários após a estabilização (PEREIRA, 2012). Ingles e Metcalf (1972) adicionam o controle da expansibilidade quando em contato com a água e complementam, ainda, que o processo deve ser pensado visando também a prevenção contra condições adversas desenvolvidas tanto na construção quanto na vida útil da obra, e não a exclusiva correção das propriedades naturais.

Segundo Corrêa (2008), correções só serão efetivas, em uma estabilização dita bem-sucedida, se os princípios de atuação do estabilizante e as características do material a ser estabilizado forem conhecidos. O cimento como aditivo químico, por exemplo, pode ocasionar ganhos de resistência a curto prazo em solos com predominância de caulinita e ilita, ou densidade e coesão superiores em solos muito arenosos (INGLES; METCALF, 1972).

Com os conceitos explanados até aqui, conclui-se que a estabilização ótima do solo consiste na alteração, a longo prazo e *in loco*, de suas propriedades geotécnicas, como resistência, deformabilidade, expansibilidade ou permeabilidade, para torná-lo apto a resistir às intempéries sazonais e às solicitações de tráfego, conforme as especificações do projeto de estrada, tendo por base os métodos ou as ações do aditivo utilizado.

2.2 Tipos de estabilização de solos

As propriedades favoráveis de um solo podem ser reparadas e estabilizadas de inúmeras formas, e a depender do mecanismo ou estabilizante utilizado, encontram-se na literatura classificações para os processos de estabilização. Caputo (1987 apud CABALA, 2007), Guimarães (2002), Bento (2006) e Oliveira (2010) relatam dois grandes agrupamentos:

- a) Estabilização mecânica, a qual envolve a correção ou rearranjo granulométrico por retirada ou incorporação de certas quantidades de frações constituintes, que tendem a aumentar a coesão e o ângulo de atrito interno do material, ou por compactação, até que as propriedades atinjam os requisitos normativos;
- b) Estabilização química, a qual envolve a utilização em quantidade suficiente de aditivos de ação cimentante, como cal, cimento Portland, materiais betuminosos, resinas, subprodutos industriais etc., que impermeabilizam e restringem os efeitos da água na resistência até que se alcancem alterações permanentes e significativas de propriedades.

Kezdi (1979 apud NÚÑEZ, 1991) e Cristelo (2001), todavia, citam a existência de uma terceira classe. Uma estabilização física é, segundo estes autores, aquela associada à variação de temperatura, à hidratação, à evaporação ou à passagem de corrente elétrica, que promovem rearranjos cristalinos ou eletrônicos dos minerais presentes.

Nota-se que, sendo o solo em obras civis quase sempre compactado, os processos citados são frequentemente combinados. O enrijecimento imediato de um solo argiloso muito úmido com adição de cimento, por exemplo, tem caráter físico-químico (INGLES; METCALF, 1972).

Optar por um método ou outro decorrerá de uma série de fatores, dentre os quais têm destaque os econômicos, os construtivos, as características do material estabilizante, bem como as propriedades a serem corrigidas, reiteradas (BARBOSA, 2013). Encontrar soluções econômicas que atendam também aos aspectos ambientais e de segurança é, para Souza e Castor (2016), um grande desafio aos engenheiros geotécnicos responsáveis pela estabilização de solos em fundações, pavimentações ou barragens.

Dentre inúmeras técnicas de estabilização, aquelas que demonstram-se mais práticas e eficientes, no que se refere à construção civil, são as químicas (FERREIRA; FALEIRO; FREIRE, 2005). Uma delas, a adição de cal, é detalhada a seguir, visto que constitui o estabilizante em destaque nesta monografia.

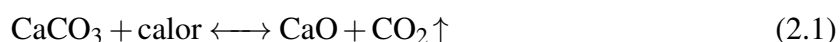
2.3 Estabilização de solo com cal

2.3.1 A cal como estabilizante

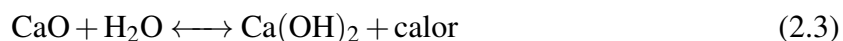
Cales são minerais inorgânicos aglomerantes que resultam da calcinação de rochas carbonatadas, constituídas majoritariamente por carbonato de cálcio, CaCO_3 , e carbonato de cálcio

e magnésio, $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$, e apresentam-se sobre a forma de óxidos ou hidróxidos (GUIMARÃES, 2002; LOVATO, 2004).

Após a extração nas jazidas, calcários ou dolomitos são submetidos à britagem e à moagem em fábricas, podendo ser embalados para comercialização ou calcinados em fornos (COELHO; TORGAL; JALADI, 2009). Se decompostos à elevadas temperaturas, são obtidos produtos conhecidos como cal virgem cálcica, CaO , ou cal virgem dolomítica, $\text{CaO} \cdot \text{MgO}$, cujas reações de formação são explicitadas nas Equações 2.1 e 2.2 (GUIMARÃES, 2002).



Um tratamento secundário consiste na hidratação dos óxidos de cálcio e/ou cálcio-magnésio com água suficiente para satisfazer afinidades químicas, representado nas possíveis reações exotérmicas a seguir (EQUAÇÕES 2.3, 2.4 e 2.5). São gerados hidróxidos — cal hidratada cálcica, $\text{Ca}(\text{OH})_2$; cal mono-hidratada dolomítica, $\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgO}$; e cal di-hidratada dolomítica, $\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2$ — comercializados em forma de pó seco com 17% a 19% de água combinada (GUIMARÃES, 2002; AZEVÊDO, 2010).



A qualidade do material, que deve satisfazer aos padrões requeridos para construção civil, provém de um rígido controle industrial, desde o minério até a hidratação. Caso contrário, tamanhos, temperaturas, triturações ou volumes d'água inadequados poderiam gerar cristais insolúveis ou com o núcleo carbonatado por falta de calor (PAIVA; GOMES; OLIVEIRA, 2007).

Os parques industriais brasileiros possuem empresas com capacidade produtiva de cal e tecnologia nivelados às mais modernas do mundo (BARBOSA, 2013). Segundo a Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SGM, 2018), do Ministério de Minas e Energia, o país detém, com 2,3% da produção mundial, a 5ª posição dentre os maiores produtores de cal, atrás da China, Estados Unidos, Índia e Rússia. Em razão de suas imensas reservas de rochas e conchas calcárias e também de dolomitos, estimou-se que em 2017 o material foi

produzido nacionalmente em 8,3 milhões de toneladas, dentre os quais um valor acima de 5 milhões é registrado apenas em Minas Gerais, estado em que se localizam as principais indústrias. Seguido por São Paulo e Paraná, as regiões Sudeste e Sul concentram cerca de 85% da toda a produção brasileira, já que nessas regiões estão instalados os maiores centros consumidores de concreto Portland e cal.

A Tabela 2.1 apresenta a composição média das cales postas no mercado interno por empresas brasileiras de médio e grande porte.

Tabela 2.1 – Composição média das cales comercializadas no mercado brasileiro.

Tipo de cal	CaO (%)	MgO (%)	Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ (%)	CO ₂ (%)	SO ₃ (%)	CaO + MgO base de não-volátil (%)	MgO não hidratado (%)
Cal virgem cálcica	90 a 98	0,1 a 0,8	0,2 a 1,0	0,2 a 3,8	0,10 a 0,60	96,0 a 98,5	-
Cal virgem dolomítica	51 a 61	30,0 a 37,0	0,2 a 1,0	0,5 a 4,5	0,05 a 0,10	76,0 a 99,0	-
Cal hidratada cálcica	70 a 74	0,1 a 1,4	0,2 a 0,8	1,5 a 3,5	0,10 a 0,00	96,0 a 98,5	0,5 a 1,8
Cal hidratada dolomítica	39 a 61	15,0 a 30,0	0,2 a 1,5	3,0 a 6,0	0,02 a 0,20	76,0 a 99,0	5,0 a 25,0

Fonte: Adaptado de Guimarães (2002).

Após o desenvolvimento tecnológico da produção nacional de cal, em meados do século XX, a técnica corretiva de solo começou a ser utilizada. Guimarães (2002) relata que três obras da década de 1960, como a Área de hangares da Varig no Aeroporto de Congonhas, a Rodovia Brasília/Fortaleza (BR-020) e a Rodovia Curitiba/Porto Alegre (ITEM 2.4), destacam-se pelo uso da estabilização.

Cal virgem ou hidratada, lama de cal ou até mesmo rocha calcária moída pode ser utilizada para tratar solos. Esta última, entretanto, não é quimicamente ativa para garantir a estabilização, possuindo fins agrícolas. Costuma-se usar cal com elevado teor de cálcio que não contenha mais que 5% de óxido (MgO) ou hidróxido de magnésio (Mg(OH)₂). Contudo, cales dolomíticas podem apresentar bom desempenho como estabilizantes, mesmo considerando que suas frações de magnésio reagem mais lentamente com o solo que as de cálcio (NLA, 2004).

Embora a cal virgem possua maior teor de óxido de cálcio e menor preço comercial, com uso bastante difuso na Europa, a cal hidratada tem emprego maior em estabilização de solos em pavimentação rodoviária no Brasil devido à facilidade de uso (AZEVEDO, 2010).

Conforme Guimarães (2002), as cales hidratadas utilizadas como estabilizante no país devem obedecer, no mínimo, às regulamentações normativas de uso em argamassas e construção civil. A norma em questão, NBR 7175 (ABNT, 2003), classifica-as, em função da sua composição química, em CH-I, CH-II e CH-III, tipos distinguidos pelos teores de cálcio e de carbonatos presentes, respectivamente maiores e menores quanto mais próximo da cal CH-I (AZEVEDO et al., 1998 apud ARAÚJO, 2009).

Acrescenta-se que o estabilizante, adicionado ao solo, não é tóxico nem para os trabalhadores envolvidos na construção, nem para plantas ou biodiversidade local, tampouco para o público caso partículas sejam transportadas pelo ar (COVER, 2016). Os maiores cuidados envolvem o transporte, a estocagem e o acondicionamento, recomendados por Oliveira (2010) anteriormente à estabilização ou durante a realização dos ensaios, para evitar alterações de umidade e carbonatação pela reação com o dióxido de carbono do ar, e, com isto, conservar suas características.

2.3.2 Solo e modificações com a adição de cal

Solos são materiais resultantes do processo de intemperismo da crosta terrestre por desintegração mecânica ou decomposição química. Suas partículas constituem-se de agregações de elementos minerais — comumente quartzo, feldspato, gipsita, calcita e mica, a depender da composição mineralógica da rocha matriz — e/ou orgânicos, cuja variação de tamanhos e de formas geram uma estrutura porosa, com vazios. Estes podem se ocupar totalmente com água, ar ou ambos, de ocorrência majoritária na natureza (BARBOSA, 2013; CABALA, 2007; OLIVEIRA, 2010).

Acepções usuais de dimensões das partículas, as “frações constituintes” do solo são designadas e limitadas por convenção. Daí, conjunto de partículas cujos diâmetros equivalentes compreendem-se entre determinados valores recebem nomes como areia, silte e argila (CAPUTO, 1987). Indicam-se, na Tabela 2.2 abaixo, duas escalas granulométricas: a da NBR 6502 (ABNT, 1995) e da American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO, bastante usadas para fins de caracterização e rodoviários, respectivamente.

Segundo Cabala (2007), solos arenosos são bem caracterizados por suas composições granulométricas, comportando-se de modo semelhante. Já os que contêm certa quantidade de fração fina precisam de uma caracterização complementar, visto que a textural não é suficiente para que o comportamento destes solos seja previsto (fato este reforçado pelas recomendações

Tabela 2.2 – Classificações das dimensões das partículas de solo propostas por duas instituições.

Instituição	Limite das dimensões das partículas (mm)							
	-			Areia grossa	Areia média	Areia fina	Silte	Argila
AASHTO	Cascalho > 2,0			2,0 a 0,42	-	0,42 a 0,074	0,074 a 0,005	< 0,005
NBR 6502 (ABNT, 1995)	Matacão 1000 a 200	Pedra-de-mão 200 a 60	Pedregulho 60 a 2,0	2,0 a 0,6	0,6 a 0,2	0,2 a 0,06	0,06 a 0,002	< 0,002

Fonte: Adaptado de Emmert (2010).

para seleção de solos para misturas com cal mencionadas adiante). Tratam-se dos limites de consistência.

Sabe-se que um solo de partícula fina pode existir em vários estados, delimitados à quantidade de água presente no sistema. Dependendo da umidade, solos argilosos apresentam-se de forma sólida, semi-sólida, plástica ou líquida. Os limites, intermediários a tais estados, foram definidos por Atterberg em 1991 em limite de contração (LC), de plasticidade (LP) e de liquidez (LL), respectivamente (PINTO, 2000). À diferença entre os valores de LL e LP dá-se o nome de índice de plasticidade, IP, que é máximo para as argilas e nulo para as areias. Constitui-se, então, um critério de mensuração do caráter argiloso de um solo (CAPUTO, 1987).

Análises sobre as frações finas mostram que a superfície das partículas sólidas são eletricamente negativas, cuja intensidade de carga depende, principalmente, de sua mineralogia. As interações físicas e químicas decorrentes dessa carga superficial constituem a atividade de superfície do mineral, mensurada por um índice proposto por Skempton em 1953, *A*, razão entre IP e a porcentagem em peso das partículas menores que 0,002 mm. As argilas classificam-se, em função do seu valor, em inativas se $A < 0,75$, normais se $0,75 < A < 1,25$ e ativas se $A > 1,25$ (CAPUTO, 1987).

A granulometria e os limites citados são base dos principais sistemas de classificação de solo empregados no Brasil, que objetivam agrupar e identificar solos com comportamentos geotécnicos semelhantes (PINTO, 2000). Bastante utilizados pelos órgãos rodoviários do país, são o Sistema Unificado de Classificação de Solos - SUCS e o Sistema de Classificação da Highway Research Board - HRB, atual Transportation Research Board - TRB (CORRÊA, 2008; AZEVÊDO, 2010). Este último os divide em granulares, de A1 a A3, e finos, de A-4 a A-7, como mostra o Quadro 2.1.

Guimarães (1971 apud AZEVÊDO, 2010) afirma a suscetibilidade dos solos A5, A6, A7 e muitos dos A-2-6 e A-2-7 à estabilização química com cal. É acrescentado pelo autor que,

Quadro 2.1 – Classificação de solos da Highway Research Board - HRB.

Classificação geral	Materiais granulares: 35% ou menos passando na peneira n.º 200							Materiais finos: mais que 35% passando na peneira n.º 200			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7, A-7-5 e A-7-6
Classificação em grupos	A-1-A	A-1-B		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Granulometria: % passando na peneira - N.º 10 N.º 40 N.º 200 (F_{200})	50 máx. 30 máx. 15 máx.	30 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração passando na peneira n.º 40 - Limite de liquidez (LL) Índice de plasticidade (IP)				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de grupo (IG)**	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia		Pedregulho ou areias siltsosas ou argilosas				Solos siltsosos		Solos argilosos		
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

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

** Para solos finos, $IG = (F_{200} - 35) \cdot [0,2 + 0,005 \cdot (LL - 40)] + 0,01 \cdot (F_{200} - 15) \cdot (IP - 10)$.

Fonte: Adaptado de DNIT (2006).

sendo a caulinita o argilomineral componente da fração fina, a reação com o aditivo processa-se lentamente. O fato agrava-se caso haja predominância de óxidos ou hidróxidos de ferro na fração argilosa, visto a difícil substituição dos íons Ca^{2+} pelos Fe^{2+} , raramente disponíveis em meio básico. Se, ao contrário, minerais aluminosos compuserem a fração fina, comuns em solos ferralíticos da América do Sul, a reatividade é grande e a estabilização dita satisfatória.

Quanto aos solos classificados pelo SUCS, Little (1995 apud BEHAK, 2013) relata que aqueles designados CH, CL, MH, SC, SM, SW-SC, SP-SC, SM-SC, GP-GC ou GM-GC são potencialmente capazes de sofrerem tal estabilização.

Intera-se que, desde que materiais finos componham sua fração argilosa, fornecendo sílica e alumina, existirão reações pozolânicas com qualquer solo e consequentes ganhos de qualidade, mais efetivos quanto maior esta fração, para um mesmo teor de cal e tipo de argilomineral componente. Solos argilosos e expansivos, seixos argilosos, argilas siltsosas e argilas puras tendem a ser, então, propícios à estabilização (AZEVEDO, 2010). O privilégio das argilas, entretanto, não descarta a possibilidade de adição de cal em solos siltsosos ou arenosos, cuja aptidão pode ser avaliada por meio de ensaios laboratoriais (SILVA, 2010).

Outro parâmetro de eficácia da estabilização com cal é a plasticidade do solo, quantificada pelo valor de IP, a qual é proporcional (NEVES, 1993 apud SILVA, 2010). Junto à porcentagem de finos, compõem um critério bastante recorrente na bibliografia, apresentado pela organização estadunidense National Lime Association (NLA, 2004): mínimo de 25% de passante na peneira n.º 200 (0,075 mm) e $IP > 10\%$. Reproduzido no Quadro 2.2, apresenta-se a possível escolha da cal ante o cimento para melhoria de solos instáveis, para fins de comparação.

Quadro 2.2 – Critério de escolha do estabilizante mais efetivo.

Estabilizante	Propriedades do solo					
	Mais que 25% passando na peneira de 0,075 mm			Menos que 25% passando na peneira de 0,075 mm		
	$IP \leq 0$	$10\% < IP < 20\%$	$IP \geq 20\%$	$IP \leq 6\%$ $LP \leq 60\%$	$6\% < IP \leq 10\%$	$IP > 10\%$
Cimento	Sim	Sim	-	Sim	Sim	Sim
Cal	-	Sim	Sim	Não	-	Sim

Fonte: IFG (2005 apud ARAÚJO, 2009).

Mesmo com conceitos de melhoramento e estabilização similares, os efeitos reativos são mais rápidos no solo-cal do que no solo-cimento (CRISTELO, 2001). Obviamente, tanto a cinética química quanto o critério exposto não são os únicos fatores levados em conta na escolha do melhor material estabilizante.

Uma das principais modificações apresentadas no solo com a adição de cal dá-se em suas características de compactação. Segundo o relatório do TRB (1987 apud BARBOSA, 2013), à medida que o teor de cal é aumentado, notam-se reduções na massa específica aparente seca máxima, $\rho_{d,max}$, e aumentos de umidade ótima, w_{ot} . Isto provém da floculação das partículas causada pela permutação iônica, cuja estrutura aumenta o índice de vazios, sendo necessária mais água para preenchê-los, e é forte o suficiente para resistir à compactação, resultando em uma curva achatada. Há influência do tipo de cal: Guimarães (1971 apud LOVATO, 2004) observou w_{ot} em média 1,3% maior para as misturas com cal cálcica que para dolomítica.

Acréscimos mecânicos dos solos com cal são verificados em ensaios de resistência à compressão simples (RCS), compressão triaxial e ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), sendo o primeiro mais utilizado e o último não recomendado após cura. Assim, o ganho de resistência é dependente dos seguintes fatores: tipo de solo e cal, teor de cal, tempo e temperatura de cura (TRB, 1987 apud BARBOSA, 2013).

Os resultados de Lovato (2004) para misturas de um solo A-6, segundo classificação HBR, com cal dolomítica e cálcica são expostos na Tabela 2.3 e confirmam as constatações explanadas:

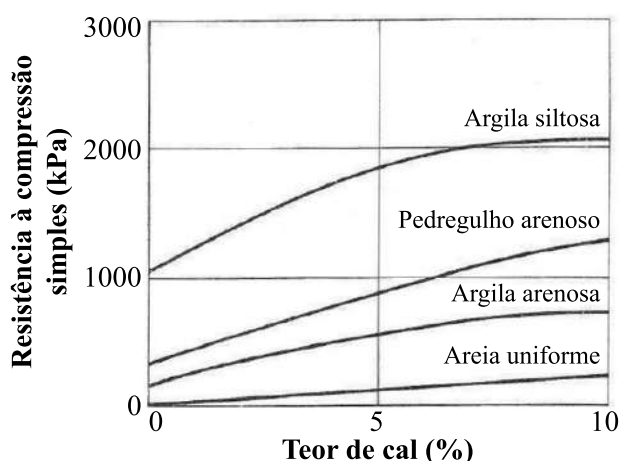
Tabela 2.3 – Características de compactação e resistência à compressão simples de misturas solo-cal encontradas por Lovato (2004).

Teor e tipo de cal	$\rho_{d,max}$ (g/cm ³)	w _{ot} (%)	RCS aos 14 dias (kPa)	RCS aos 28 dias (kPa)
Solo natural	1,80	17,4	-	-
3%, cálcica	1,70	18,5	881	905
4%, cálcica	1,69	18,2	1429	1519
5%, cálcica	1,69	18,7	1997	2002
3%, dolomítica	1,72	17,2	389	561
4%, dolomítica	1,72	18,2	698	706
5%, dolomítica	1,71	18,3	756	769

Fonte: Adaptado de Lovato (2004).

Ingles e Metcalf (1972) constataram também, em diferentes tipos de solo, que para baixos teores de cal o aumento da RCS é linear, e posteriormente diminui com a adição, devido à cimentação lenta característica causada pelo excesso do aditivo, apresentada pelas misturas (FIGURA 2.1).

Figura 2.1 – Efeito do teor de cal sobre a resistência à compressão simples para misturas solo-cal curadas por 7 dias.



Fonte: Adaptado de Ingles e Metcalf (1972).

Acrescenta-se que, segundos os estudos de Thompson (1964 apud BARBOSA, 2013), a presença de matéria orgânica também influencia a estabilização: teores maiores que 1% não respondem bem à melhoria com cal, já que as reações são retardadas e obtêm-se pequenos

ganhos de resistência. Consta-se na literatura que menores valores de RCS ocorrem em solos com maiores quantidades de matéria orgânica.

2.3.3 Solo-cal e estabilização

O solo-cal é definido como mistura íntima de solo, cal e água em determinadas proporções, cuja técnica de estabilização baseia-se nas reações existentes entre argilas, quartzo e óxidos de cálcio e de magnésio que constituem os determinados materiais (AZEVEDO et al., 1998 apud ARAÚJO, 2009; GUIMARÃES, 2002).

Garantir a melhoria de solos instáveis com a adição de cal remonta à Idade Antiga. Exemplos foram encontrados ao sul da Itália, na Via Ápia, entre a Posta Capena-Capua-Brindisi, e também num trecho da Grande Muralha da China, datados de 312 e 228 a.C., respectivamente (GUIMARÃES, 2002). Entretanto, Ingles e Metcalf (1972) afirmam que tal estabilização se desenvolveu no sul estadunidense, na década de 1930, e que seu uso em argilas pesadas já era difundido nos anos 50, remanescendo desde então.

Atualmente, a estabilização de solo com cal é bastante ampla. O Quadro 2.3 sintetiza algumas possibilidades de uso.

Quadro 2.3 – Situações de uso do método de estabilização de solo com cal.

Uso	Situações
Correção de propriedades	Quando os materiais forem consideravelmente úmidos ou plásticos
	Quando for necessária maior resistência
	Quando se quer melhores trabalhabilidade e compactação
Invulnerabilidade ao clima	Quando condições meteorológicas adversas afetam o local
Qualidade de estradas	Quando se necessita de camadas de qualidade superior a da sub-base em pavimentações rodoviárias, a partir dos solos <i>in situ</i>
	Quando forem indispensáveis trabalhos geotécnicos temporários ou nivelamento por arrasto em estradas

Fonte: Adaptado de Cristelo (2001).

A mistura de solo úmido com cal desencadeia reações físicas, físico-químicas e químicas, algumas até desconhecidas, que provocam aglutinação de partículas e modificação de características (GUIMARÃES, 2002). As mais importantes durante o processo de estabilização são relacionadas a seguir (COELHO; TORRAL; JALADI, 2009):

- a) Permutação iônica – os cátions Ca^{2+} imediatamente são adsorvidos à superfície das partículas, diminuindo a dupla camada difusa e promovendo a floculação, e inicia-se o

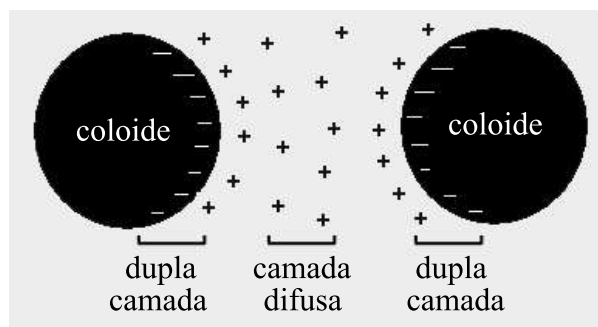
processo de cura (ou apodrecimento, em referência ao cheiro desenvolvido), tornando-o friável e facilmente desagregável. A argila, agora com maiores dimensões, perde plasticidade, coesão e expansibilidade, enquanto a trabalhabilidade é aumentada;

- b) Ação de cimentação ou reação pozolânica – a interação entre a cal, a sílica e a alumina livre das argilas promove a formação de silicato de cálcio hidratado, $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, e/ou aluminato de cálcio hidratado, duas substâncias cimentícias que ligam as partículas argilosas. A reação é extremamente lenta, podendo ser acelerada com aditivos, e é favorecida por condições climáticas quentes e por pH elevado promovido pelo sistema cal-água;
- c) Ação de carbonatação – a exposição à atmosfera promove reação dos íons carbonatos ou bicarbonatos do gás carbônico, CO_2 , com os cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} da cal, formando carbonatos de cálcio, CaCO_3 , ou de magnésio, MgCO_3 (nota-se no Item 2.3.1, que a reação é inversa a produção da cal a partir do calcário). Esses produtos, não desejados, intervêm na ação de cimentação e impedem o alcance da resistência desejada (CASTRO; SERAFIM, 1974 apud COELHO; TORGAL; JALADI, 2009).

Sendo a superfície dos argilominerais, coloides sólidos, deficiente em carga, possuindo carga elétrica predominantemente negativa, cátions e moléculas de água são atraídos para a superfície de clivagem para neutralizá-la, o que resulta na separação de duas camadas (FIGURA 2.2), nomeadas de “dupla camada difusa” (PRUSINSKI; BHATTACHARJA, 1999 apud DALLA ROSA, 2009). Como a ordem de adsorção preferencial de cátions comuns é, assumindo igual concentração, de $\text{Al}^{3+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ (isto é, substituição de cátions de menor valência por de maior valência), a adição suficiente de cal, fonte livre de cálcio, cria concentrações de cátions Ca^{2+} facilmente absorvidas pela superfície dos coloides do solo, explicando o caráter imediato da reação (THOMÉ, 1994 apud DALLA ROSA, 2009).

São revistos aqui, para distinção mais clara, os conceitos de melhoramento e estabilização, com base nas reações descritas. Em um solo modificado pela cal, segundo Little (1999), há predominância de permutação iônica devido ao imediatismo de sua ocorrência. A redução da plasticidade e da suscetibilidade à água e as melhorias de estabilidade e trabalhabilidade são notórias, porém apenas solos estabilizados apresentam também ganhos de resistência, função do desenvolvimento a longo prazo de reações pozolânicas, que estendem-se por anos se houver cal e pH elevado o suficiente para ocorrência (AZEVEDO et al., 1998 apud ARAÚJO, 2009). Esse

Figura 2.2 – Dupla camada difusa.



Fonte: Adaptado de Castelan (1998 apud SOUZA; CASTOR, 2016).

efeito da estabilização é notório após 28 dias de cura ou mais, período que poderia ser acelerado se a temperatura do sistema fosse aumentada (KLINSKY; FURLAN; FABBRI, 2012).

Intera-se que é de consenso literário que a trocas catiônicas na permutação também dão origem a pequenos aumentos na resistência mecânica das misturas solo-cal, contudo são consideráveis somente após o processo de cimentação (PESSOA, 2004).

A relação densidade-resistência de solos estabilizados é, para Oliveira (2010), digna de atenção. O autor observa que, devido às reações pela adição de cal, é permitido que a densidade decresça sem que a resistência também o faça, fator fundamental para o bom andamento de obras rodoviárias. Logo, quando o material é compactado com energia a fim de se obter uma maior massa específica, normalmente apresenta substancial elevação de resistência.

Dependendo da reatividade do solo e da homogeneização da mistura, os resultados relacionados à reação pozolânica podem ser mais eficazes à amostra. Compreendem nestes o aumento do valor do módulo de resiliência, em um fator maior ou igual a 10; a resistência ao cisalhamento melhorada, em fator maior ou igual a 20; e os contínuos ganhos de resistência e de durabilidade, mesmo que sobre efeito de variação climática ou carregamentos (LITTLE, 1999).

Herrin e Mitchell (1968 apud OLIVEIRA, 2010) relatam outra consequência da adição de cal: solos-cal são pouco afetados por chuvas fortes e prolongadas, já que é possível compactá-lo satisfatoriamente, devido à mistura tornar-se friável, ter plasticidade diminuída e secar rapidamente. Projetos em locais com tal ocorrência poderiam, então, reduzir perdas de tempo e gastos de manutenção com o emprego do estabilizante.

Os custos relativamente baixos de implementação e execução tornam esta técnica bastante atrativa, quando comparado às soluções tradicionais de estabilização de solos (CORRÊA, 2008).

2.3.4 Fatores que influenciam as reações solo-cal

É frisado, como no Item 2.3.2, que as reações estabilizantes influenciam-se diretamente pelo tempo e temperatura de cura ao qual submete-se a mistura, pelas características do solo tratado e também da cal adicionada (SANTOS, 2004). A temperatura, por exemplo, foi avaliada por Serafini et al. (2004), que concluíram haver maiores ganhos de resistência consequentes de reações pozolânicas em solos de Passo Fundo/RS e Ijuí/RS sob cura superior a 30 °C. Esta não é, todavia, a única influência externa na estabilização: esforços mecânicos e fatores ambientais, como níveis d'água superficial e/ou subterrâneo, precipitações pluviométricas e até mesmo a presença de dióxido de carbônico (CO₂) atmosférico, podem alterar significativamente os resultados desejados (GUIMARÃES, 2002).

Acredita-se que as variáveis mais relevantes se relacionam às cales. Nóbrega (1981 apud ARAÚJO, 2009) explica que as modificações de comportamento nos argilominerais do solo são causadas, principalmente, pelos íons de cálcio e magnésio presentes na cal, seja ela virgem ou hidratada. A autora expõe também que as reações com cada solo são particulares à cal adicionada, não devendo a escolha desta ser aleatória. De modo geral e macroscópico, a adição de cal reflete-se sempre em variações favoráveis das características físicas: granulometria, umidade, plasticidade, trabalhabilidade, expansibilidade, permeabilidade, compactação e resistência (GUIMARÃES, 1971 apud DALLA ROSA, 2009).

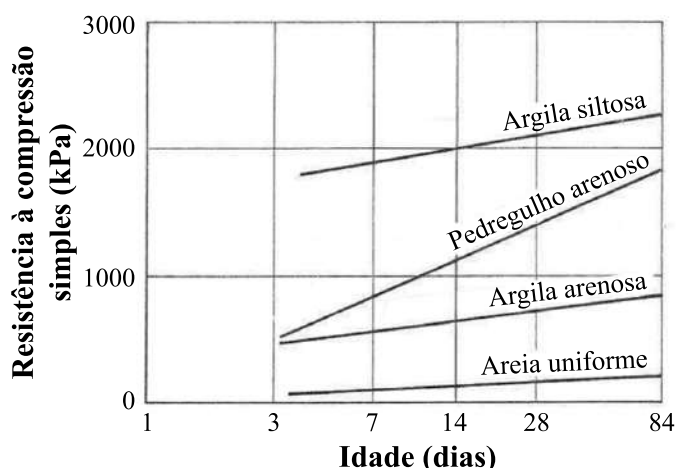
Prusinski e Bhattacharja (1999 apud BENTO, 2006) relatam, quanto à dosagem do estabilizante químico, haver dependência dos objetivos geotécnicos da obra. Ao contrário da modificação, a estabilização do solo confere ganhos mecânicos e exige um maior grau de tratamento, necessário para que as reações não sejam exclusivamente rápidas e para que haja formação de produtos cimentantes. Bento (2006) complementa que o teor de cálcio na cal presente, então, deve ser suficiente para permitir trocas catiônicas, floculação e aglomeração, bem como o desenvolvimento de resistência, e é base para metodologias de determinação de dosagem, listados no Item 2.3.5, por ensaios de pH, resistência à compressão simples, redução da plasticidade, entre outros.

A reatividade do solo com cal também é influenciada por características intrínsecas a este. Destacam-se a mineralogia da fração argila, a quantidade de matéria orgânica (já citada no Item 2.3.2), a drenagem natural, a presença de ferro, carbonatos, sulfatos e sódio permutável em excesso, as relações sílica/alumínio e sílica/sesquióxidos, o grau de intemperismo, e o pH (MALLELA; QUINTUS; SMITH, 2004).

Discorre-se sobre os dois últimos. O pH intervém na formação dos compostos pozolânicos: pH maiores que 9 causam a solubilização do silício e do alumínio, estáveis em condições normais, que tendem a recombinar com o cálcio e formar silicatos, aluminatos ou alumínio-silicatos, de propriedades cimentantes (NÓBREGA, 1981 apud ARAÚJO, 2009). Mendonça et al. (1998 apud BENTO, 2006), por sua vez, estudaram os solos regionais de Viçosa/MG com graus de intemperização distintos, que apresentaram desempenhos expressivos em diferentes teores de cal e tempos de cura.

Os períodos nos quais as misturas solo-cal permanecem sob cura, em estudos de resistência, são de suma importância. Análises de Ingles e Metcalf (1972) relativas à influência do tempo em diferentes solos são recorrentes na literatura: observa-se, conforme a Figura 2.3, maiores taxas de ganhos de resistência com os dias em pedregulhos arenosos que nos demais solos. Variações pouco significativas são notadas não só pelos autores, mas por diversos outros, para tempos de cura de apenas uma semana.

Figura 2.3 – Efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para misturas solo-cal.



Fonte: Adaptado de Ingles e Metcalf (1972).

Algumas substâncias químicas (como cloreto, hidróxido ou carbonato de sódio) podem, se bem utilizadas, atuar como catalisadores e otimizar a estabilização com cal. Há não só aceleração significativa das reações pozolânicas, que proporcionam acréscimos de resistência na fase inicial do processo, como valores de resistência superiores e menor deformabilidade. A eficácia, porém, é dependente da quantidade adicionada, do tipo de solo e também da cal (SILVA, 2010).

Com as informações acima, nota-se a interdependência de vários fatores na estabilização do solo, desde propriedades do solo até aspectos ambientais. Contudo, são pouco analisados

em obras de infraestrutura rodoviária, cujos projetos preocupam-se, à priori, com as condições de utilização do estabilizante e de demais recursos, como custo-benefício, finanças ou demanda de equipamentos (ARAÚJO, 2009).

2.3.5 Métodos de dosagem

A literatura dispõe de métodos distintos e variados de dosagem de misturas solo-cal, cuja reprodução por pesquisadores fornece resultados satisfatórios ou não, a depender do tipo de solo, da cal, da reatividade dos mesmos ou da forma de execução (OLIVEIRA, 2010). Três deles, bastante recorrentes, são detalhados abaixo:

- a) Método do pH – Consiste na determinação da mais baixa porcentagem de cal que, após uma hora de mistura em solução, assegurar um $\text{pH} = 12,4$, ou, caso inatingível, um $\text{pH} = 12,3$ inalterável com a adição de até 2% de estabilizante. Este método garante a ocorrência de reações pozolânicas por meio da anulação da plasticidade, mas nem sempre resulta em resistência ótima em ensaios (EADES; GRIM, 1966 apud ARAÚJO, 2009). Desenvolvido para solos de clima temperados, apresenta limitações quanto ao uso em solos tropicais e subtropicais, cujo teor resultante não é suficiente para estabilizá-los (NÚÑEZ, 1991);
- b) Método de Thompson – Consiste na avaliação da resistência à compressão simples de misturas solos-cal, considerando reativas aquelas que apresentarem incrementos de, pelo menos, 345 kN/m^2 após 28 dias de cura à temperatura de $22,8 \text{ }^\circ\text{C}$ e imersão prévia em água 24 horas antes da ruptura. Os procedimentos de execução diferem para solos reativos e não reativos: para os primeiros, objetiva ocorrência de reações que proporcionam resistência e durabilidade, enquanto pode melhorar consideravelmente o ISC, a expansão e a plasticidade dos últimos (THOMPSON, 1966 apud OLIVEIRA, 2010);
- c) Método do *lime fixation point* ou ponto de fixação de cal – Consiste na obtenção do máximo valor de LP com incrementos de cal, nomeado LFP, cujos teores acima deste promovem ganhos mecânicos sem alterações na consistência, e quando encontrado, adicionam-se mais 4% no teor para devida estabilização. Este método objetiva, conforme dito, melhorias de trabalhabilidade sem aumentos significativos de resistência (HILT; DAVIDSON, 1960 apud NÚÑEZ, 1991).

Embora os métodos de dosagem indiquem teores exatos, recomenda-se tanto em estabilizações e melhoramentos de solo no campo acréscimo de 0,5% a 1%, que compense homogeneizações deficientes, perdas na construção, entre outros problemas (THOMPSON, 1966 apud OLIVEIRA, 2010). Coelho, Torgal e Jaladi (2009) propõem, ainda, que tal teor situe-se entre 3% e 10%, cuja utilização de quantidade superiores não é econômica ou necessária e de inferiores dificulta as condições de mistura em obras.

2.4 Estabilização de solo com cal para uso em estradas

Em consequência da redução da umidade e de melhoras na trabalhabilidade do solo, a adição de cal facilita a execução de plataformas de trabalho adequadas para construções civis. Junto à redução do potencial expansivo, é frequentemente acrescida a solos muito molhados, cujas condições meteorológicas locais ou prazos de execução impedem a completa secagem, em obras como estradas (COVER, 2016). Este foi o principal motivo, conforme cita Azevêdo (2010), pelo qual estabilizou-se com cal o subleito da rodovia BR-381, no segmento entre Nepomuceno/MG e Três Corações/MG, dois municípios próximos a Lavras/MG. Ganhos de resistência decorrentes foram constatados no pavimento em questão.

De modo geral, publicações relativas à estabilização química de solo com cal para aplicações em estradas concentram-se, majoritariamente, na definição de dosagem ótima para misturas, visando ganhos significativos de resistência mecânica, seja ela dada pela variação do ISC ou mesmo da RCS (AZEVEDO, 2010).

Entretanto, opta-se listar outros trabalhos desenvolvidos no Brasil (QUADRO 2.4), cujo uso da técnica solo-cal em estradas apresentou, na maioria deles, desempenhos estruturais bastante satisfatórios. Destes, destacam-se alguns resultados.

Azevêdo e Ramalho (2000 apud LOVATO, 2004), por exemplo, após comparação com solo-brita e estabilização com brita graduada, duas soluções “tradicionais” para solos inadequados, comprovaram a viabilidade técnica e econômica da aplicação do solo-cal nas bases das estradas mineiras mencionadas.

As análises de Loiola e Nobre Júnior (2001 apud ARAÚJO, 2009), por outro lado, indicaram que a rodovia de acesso ao distrito de Flores, no município de Russas/CE, executada com uma técnica de mistura local por espalhamento manual de sacos de cal (FIGURA 2.4), apresentou comportamento excelente, após um ano de construção, sob ação de tráfego de 851 veículos/dia, leves e pesados, superando a carga de 50 veículos/dia estimada em projeto.

Quadro 2.4 – Estradas brasileiras com uso de solo-cal em camadas estruturais.

Estrada	Localização	Extensão	Solo	Teor de cal	Camada	Mencionada por
Rodovia de acesso ao distrito de Flores (Russas/CE)	Limoeiro do Norte/CE a Russas/CE	-	Areno-siltoso (A-4) e argiloso (A-7-6)	-	base e sub-base	Loiola e Nobre Júnior (2001 apud ARAÚJO, 2009)
Rodovia “do Melão” ou CE-377	Entre Limoeiro do Norte/CE e Tabuleiro do Norte/CE	40 km	-	5%	base	Loiola e Barroso (2007 apud ARAÚJO, 2009)
BR-020 ou Rodovia Brasília/Fortaleza	Próximo a Sobradinho/DF	2 trechos de 150 m	Laterítico (LL = 41% e IP = 11%)	1% e 3%	base e sub-base	Guimarães (1971 apud LOVATO, 2004)
Rodovia BR-116	Entre Muriaé/MG e Fervedouro/MG	-	Laterítico argiloso amarelo (LL = 73% e IP = 32%)	9%	base	Medina (1989 apud LOVATO, 2004)
Rodovia BR-262; Rodovia que liga a Serra dos Aimorés à divisa MG/BA; Rodovia ligando Guapé/MG e Ilicéa/MG	Mesorregião do Vale do Mucuri (MG)	-	A-7-6 ou A-7-5	4%	base	Azevêdo e Ramalho (2000 apud LOVATO, 2004)
Avenida Lúcio Costa ou antiga Avenida Sernambetida	Rio de Janeiro/RJ	18 km	25% a 33% de retidos na peneira n.º 200	3% e 4%	base	Guimarães (1971 apud LOVATO, 2004)
Rodovia RJ-116	Cachoeiras de Macacu/RJ	150 m	Laterítico argiloso amarelo (LL = 54% e IP = 19%)	4%	base	Medina (1989 apud LOVATO, 2004)
Rodovia Curitiba/Porto Alegre	Próximo ao km 10 (PR)	1000 m	Siltoso	3% e 7%	-	Guimarães (1971 apud LOVATO, 2004)
Rodovia Cruz-Alta/Cara-zinho	BR-377/RS	-	Argilo-arenoso	4%	-	Guimarães (1971 apud LOVATO, 2004)

Fonte: Do autor (2019).

Figura 2.4 – Execução do trecho de acesso ao distrito de Flores (Russas/CE): (a) espalhamento manual de sacos de cal e posterior (b) mistura por plaina niveladora.



(a)



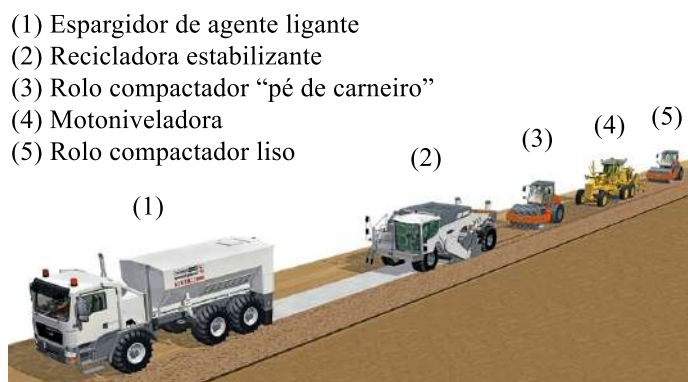
(b)

Fonte: Araújo (2009).

É apresentado na Figura 2.4 um processo de estabilização de solo com cal *in situ* para aplicação em base e sub-base de estradas. Conforme informa o *site* The Engineering Community (2018), procedimentos como estes variam a depender do projeto e demandam, para eficácia de execução, máquinas adequadas especificamente desenvolvidas. Comumente, as etapas

consistem em preparação da superfície (que inclui demarcação, remoção de material orgânico grosseiro, nivelamentos e correções de drenagem e expansibilidade, que garantam a drenagem e evitem a formação de poças), espalhamento de cal e água (distribuição em taxa de dispersão precisa por espargidor hidráulico, espalhador articulado ou caminhão pipa dos produtos estabilizantes e de água para compactação ótima), homogeneização da camada (desempenhada por máquinas de estabilização ou recicladoras¹, cujos tambores cortantes rotativos “cavam” e misturam o solo-cal a determinadas profundidades) e compactação. É típico, nesta última, início com grandes rolos autopropulsores de dentes vibratórios, que compactam os extratos profundos; seguido de nivelamentos, que corrijam quaisquer falhas no pavimento e garantam boa aderência; e, finalmente, a passagem de um tambor liso. Os maquinários citados são ilustrados, em ordem, na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Maquinários adequados para o processo de estabilização *in situ*.



Fonte: Adaptado de The Engineering Community (2018).

Coelho, Torgal e Jaladi (2009) reforçam que, nas estabilizações que integram camadas de pavimentos rodoviários, exige-se que a mistura solo-cal apresente resistência condizente e que mantenha-a sob condições úmidas, já que acréscimos das características mecânicas e compactação ótima são objetivados após o espalhamento e a mistura com cal.

A utilização da técnica de estabilização em estradas é bastante restringida às bases e às sub-bases, como nota-se nos exemplos expostos. É raro, de fato, que solos-cal constituam camadas que revestem pavimentos, senão construções ou estradas temporárias, já que as misturas têm baixa resistência à abrasão contínua. Entretanto, estas deformações podem ser removidas com nivelamentos contínuos, que não afetam as reações solo-cal, ao contrário das estabiliza-

¹ Pesquisas mostram que estradas pavimentadas misturadas com máquinas que não estas, como tratores implementados e niveladoras, costumam romper de 1 a 3 anos devido à mistura incorreta dos materiais constituintes (THE ENGINEERING COMMUNITY, 2018).

ções com cimento. Coberturas de superfície, como asfaltos e concreto, evitam o problema e são exigidas em grande parte dos casos (KESTLER, 2009).

Os resultados das análises de monitoramento de trechos experimentais por Behak (2013) contrapõem a afirmação da má resistência ao desgaste, que consentem o possível uso em estradas vicinais. Segundo o autor, solo modificado com cal é eficiente em vias de baixo volume veicular porque, após 5 anos de tráfego, não apresentaram trincas de fadiga nem afundamentos causados por rodagem. Baixos teores, de 3 e 5%, proporcionaram ao revestimento primário dos trechos experimentais em verdadeira grandeza, localizados na vila uruguaia de Cebollatí (Departamento de Rocha), capacidade mecânica suficiente para resistir ao tráfego, neste período, sem necessidade de onerosas manutenções ou restaurações estruturais. Fortalece-se, então, o viés econômico de sua utilização: é uma técnica capaz de reduzir consideravelmente custos com reparos. O autor relata, ainda, que há pouca experiência do uso na técnica como revestimento primário em estradas de baixo volume de tráfego, aporte de sua tese. Carecem-se, então, trabalhos bibliográficos referentes à estabilização de solo com cal em estradas não pavimentadas.

Atrelado à visão de uma solução dispendiosa, poucos projetistas costumam definir as camadas de um pavimento resultantes da adição do estabilizante. Os empecilhos vistos no mercado são os custos tocantes à execução, que exige cuidados com a mão-de-obra, e a celeridade do processo, devido ao tempo de cura mínimo de 3 dias para que as reações ocorram, considerado elevado e que tende a paralisar o serviço neste período. Programas de governos pautados em execução de obras públicas rápidas não sejam, talvez, campo ideal de aplicação desta alternativa geotécnica (AZEVEDO, 2010).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Solo

O solo utilizado para os estudos de estabilização teve coleta no campus principal da Universidade Federal de Lavras, localizado no município homônimo. A jazida, que possui coordenadas geográficas 21°13'52"S e 44°58'37"O indicadas pelo *software* Google Earth Pro (2018), dista cerca de 50 m do Laboratório de Estruturas e 110 m da Estação de Tratamento de Água - ETA, duas referências locais (FIGURA 3.1).

Figura 3.1 – Situação da jazida na Universidade Federal de Lavras.



Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2018).

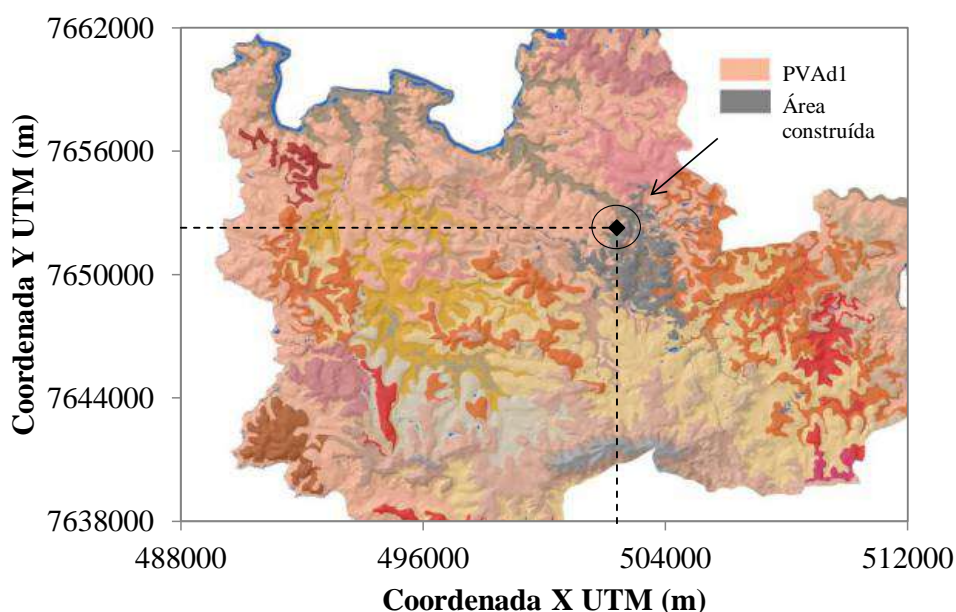
Justifica-se a escolha do local:

- a) Há proximidade da jazida com uma estrada não pavimentada. O ponto de coleta, por exemplo, situa-se a menos que 20 m desta. Reitera-se que, segundo a Pró-Reitoria de Infraestrutura e Logística - PROINFRA, setor responsável por obras civis e manutenções da universidade, as estradas vicinais internas costumam apresentar desníveis, causados pelas prováveis ações de tráfego veicular e de chuvas, e também empoçamentos — que a depender da intensidade pluvial, pode apresentar pontos críticos de inibição da circulação de veículos —, e necessitam anualmente de nivelamentos reparativos (informação verbal)¹;

¹ Fala do pró-reitor de Infraestrutura e Logística da Universidade Federal de Lavras, em conversa no dia 14 de março de 2019.

- b) Ainda segundo a PROINFRA, não se pretende, tanto a curto quanto a longo prazo, ocupar, pavimentar ou construir sobre a área delimitada pela jazida, que impediriam a utilização futura do recurso (informação verbal)²;
- c) Com a conversão das coordenadas geográficas para UTM em Datum SIRGAS2000, infere-se que a jazida está localizada em unidade de mapeamento de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrópico, PVAd1 (FIGURA 3.2). Conforme o levantamento pedológico feito por Silva (2017), esta classe é majoritária com a abrangência de 32,89% da área total do município. Embora tal classificação não tenha relevância geotécnica, a porcentagem indica que o solo estudado seja amplamente comum no município, no que se refere à ocorrência em jazidas e à possibilidade de uso;

Figura 3.2 – Situação da jazida no mapeamento de classes de solo do município de Lavras/MG.



Fonte: Adaptado de Silva (2017).

- d) Análises granulométricas anteriores em local próximo, realizadas para fins didáticos da disciplina de Mecânica dos Solos I, indicavam a predominância de argila. Sabe-se, conforme Karol (2003), que solos argilosos obtêm estabilização química mais efetiva e melhorias mecânicas visíveis com a adição de cal hidratada;
- e) Há também proximidade da jazida com os locais de realização dos ensaios laboratoriais, que em muito facilitou o transporte do solo.

² Fala do pró-reitor de Infraestrutura e Logística da Universidade Federal de Lavras, em conversa no dia 14 de março de 2019.

A extração do material na jazida (FIGURA 3.3(a)), foi feita com enxadas, pás e sacos plásticos, e ocorreu em profundidade maior que 10 cm. Coletou-se quantidade deformada suficiente, próxima de 50 kg, cujos testes experimentais futuramente descritos demandaram. Transportou-se, então, o solo para o Laboratório de Geotecnia Ambiental e Resíduos Sólidos, do Núcleo de Engenharia Ambiental e Sanitária, a qual dista 260 m, para realização dos ensaios. Lá, foi devidamente limpo, retirando a matéria orgânica grosseira, e permaneceu em secagem natural ao ar, conforme a Figura 3.3(b).

Figura 3.3 – Solo de estudo: (a) em ocorrência na jazida e (b) em secagem ao ar pós-coleta.



(a)



(b)

Fonte: Do autor (2019).

3.2 Cal

Cal dolomítica hidratada do tipo CH-I foi utilizada nos estudos de dosagem e na preparação de misturas. Reitera-se que, como a maioria das estabilizações de solos são feitas com cales de elevada porcentagem de cálcio e baixa de óxido de magnésio (NLA, 2004), optou-se pelo CH-I, por ser, dentre os três tipos, aquele com maior teor de cálcio (AZEVEDO et al., 1998 apud ARAÚJO, 2009) e, conforme exigências da NBR 7175 (ABNT, 2003), menor teor relativo de óxido de magnésio.

Adquiriu-se o produto, cuja marca e fabricante não serão identificadas, em uma unidade de 15 kg. É produzido em Arcos/MG, atendendo às regulamentações técnicas da referida norma, e trata-se, segundo um vendedor local, da cal tipo CH-I mais abundante e também vendida no município de Lavras/MG (informação verbal)³.

³ Fala de Alisson, vendedor de uma das maiores lojas de materiais de construção civil do município de Lavras/MG, em conversa no dia 31 de janeiro de 2019.

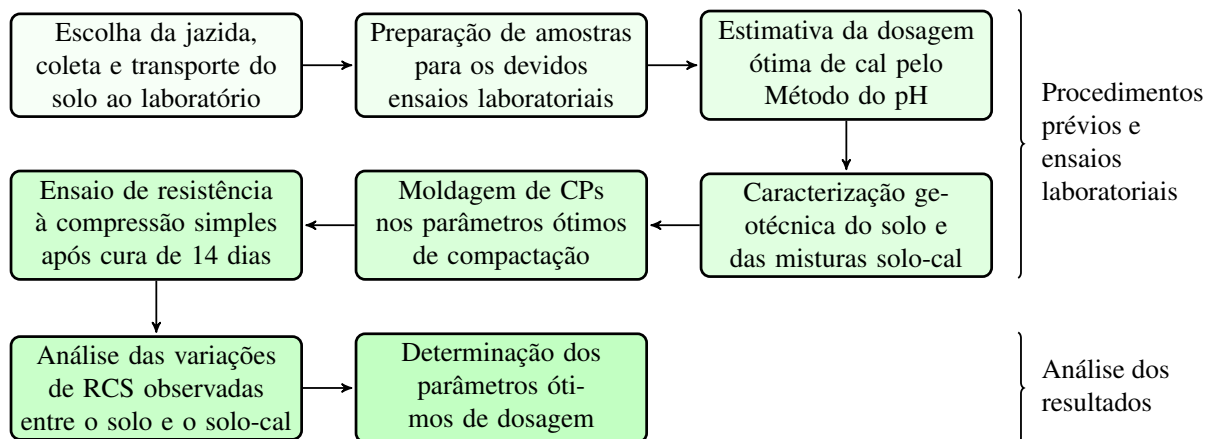
3.3 Água

Os ensaios de caracterização e de dosagem e a confecção dos corpos de prova de solo e solo-cal, conforme normatização e/ou metodologia, demandaram o uso de água destilada. Ademais, foi utilizada água potável para a imersão teste do CP cilíndrico 24 horas antes do ensaio mecânico. Esta é captada em uma lagoa situada a quilômetros do local, devidamente tratada pela ETA da universidade e enfim distribuída, obedecendo às portarias de potabilidade para consumo humano.

3.4 Procedimento metodológico

A metodologia da presente pesquisa, baseada no trabalho de Cover (2016), foi sintetizada para prévia compreensão nas etapas mostradas na Figura 3.4, descritas com mais detalhes nos subitens a seguir.

Figura 3.4 – Fluxograma simplificado do programa metodológico adotado.



Fonte: Do autor (2019).

3.4.1 Estimativa da dosagem

Estimou-se a dosagem das misturas solo-cal pelo dito Método do pH, proposto pelos estadunidenses Eades e Grim em 1966. Os autores preconizam que o menor teor de cal adicionado em uma solução de solo que proporcione valor de pH de 12,4 assegura a estabilização do mesmo (EADES; GRIM, 1966 apud ARAÚJO, 2009). Faz-se necessária, então, a descrição dos procedimentos para sua execução, cujas etapas são:

1. Adicionar 20 g de solo seco e passado na peneira de n.º 40 (0,42 mm), precisos em 0,1 g, em, no mínimo, 5 recipientes;

2. Acrescentar cal em cada recipiente, em teores crescentes e relativos à massa seca de solo (ex.: 1%, 2% , ...), aferida com precisão de 0,01 g;
3. Adicionar 100 ml de água destilada às misturas de solo-cal, agitando o recipiente para homogeneizá-las (FIGURA 3.5(a));
4. A cada 10 minutos, agitar os recipientes, novamente, por 30 segundos, e, decorrida uma hora de ensaio, aferir o pH da soluções.

Figura 3.5 – Metodologia experimental de dosagem por pH: (a) soluções aquosas de solo-cal, cujo pH será aferido por (b) pHmetro portátil.



Fonte: Do autor (2019).

Na determinação dos valores de pH das soluções aquosas foi utilizado um pHmetro de bolso da marca KASVI[®], modelo K39-0014PA (FIGURA 3.5(b)), com 0,1 de precisão. O equipamento teve de ser previamente calibrado com soluções tampão de pH 4, 7 e 10.

Em acréscimos de 0,5% em teor, as misturas foram ensaiadas, partindo de 0 até a porcentagem inteira de cal que alcalinizou a solução em um pH igual ou maior que 12,4.

3.4.2 Ensaio de caracterização geotécnica

Neste trabalho, foram caracterizadas, baseando-se nas prescrições técnicas relacionadas no Quadro 3.1, amostras deformadas de solo quanto à massa específica dos grãos, distribuição granulométrica, limites de consistência e compactação, sendo esta última necessária para o estudo de dosagem solos-cal. Todas as amostras foram preparadas conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016a), norma que estabelece procedimentos prévios para a execução dos ensaios experimentais, tais como secagem ao ar, destorroamento, homogeneização e separação de quantidades necessárias.

Quadro 3.1 – Procedimentos geotécnicos laboratoriais de caracterização.

Procedimento	Norma técnica
Ensaio de massa específica dos sólidos	ME 093/94 (DNER, 1994)
Análise granulométrica	NBR 7181 (ABNT, 2016d)
Ensaio de limite de plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016c)
Ensaio de limite de liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2016b)
Ensaio de compactação	NBR 7182 (ABNT, 2016e)

Fonte: Do autor (2019).

Listam-se a seguir algumas informações complementares ou valores de referência:

- A massa específica real dos grãos de solo, ρ_s , além de representar a densidade média dos minerais componentes, situando-se entre 2,6 a 2,75 g/cm³ para solos minerais com predominância de quartzo, feldspato, mica e coloides silicatados e entre 0,9 a 1,4 g/cm³ para solos muito orgânicos (BRADY; WEIL, 2009), também desempenha papel importante na compressão ou determinação de outras propriedades físicas.;
- A curva granulométrica é parâmetro de classificação dos solos quanto às frações predominantes (argila, silte ou areia) e permite, ainda, avaliar as suas graduações quanto à uniformidade e à continuidade dos grãos, por meio do cálculo dos coeficientes de uniformidade C_u e de curvatura C_c (PINTO, 2000).;
- A consistência determina o comportamento do solo ante determinadas tensões e deformações, sendo uma característica geotécnica importante e controlada (SOUZA; RAFFULL; VIEIRA, 2000). O limite de plasticidade e o índice de plasticidade, são, por exemplo, delimitados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte para solos usados em base ou sub-base de pavimentações rodoviárias (DNIT, 2006);
- Na Tabela 3.1, relacionam-se resultados de análises texturais de compactações de solos encontrados em Lavras/MG, úteis na determinação da umidade ótima previsível e usados para comparação.

3.4.3 Confeção dos corpos de prova para ensaio mecânico

A execução do ensaio de resistência à compressão simples demandou a confeção prévia de corpos de provas (CPs) cilíndricos de solo e solo-cal, conforme estabelecido na norma técnica NBR 12770 (ABNT, 1992).

Tabela 3.1 – Composição granulométrica e características de compactação de solos típicos do município de Lavras/MG.

Classe pedológica	Fração (%)			$\rho_{d,max}$ (g/cm ³)	W _{ot} (%)
	Argila	Silte	Areia		
Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico	37	17	46	1,57	20
Latossolo Vermelho-Escuro distrófico	57	18	25	1,44	26
Latossolo Roxo distrófico	57	27	16	1,43	30
Podzólico Vermelho-Amarelo distrófico	30	31	39	1,53	22
Cambissolo distrófico	13	39	48	1,64	16

Fonte: Adaptado de Dias Junior e Miranda (2000).

Conhecidas as suas dimensões volumétricas, diâmetro interno D de 5,0 cm e altura h de 10,0 cm, e escolhidos os parâmetros ótimos de compactação ($\rho_{d,max}$ e w_{ot}) e o teor de cal, $\%_{cal}$, determinou-se a massa de solo seco, m_s , peneirado na peneira de n.º 4 (4,75 mm) — para que o maior diâmetro de grão tenha, no máximo, 1/10 da dimensão diametral do CP —; de cal, m_c ; e de água destilada, m_w , necessárias para a execução de uma unidade (EQUAÇÕES 3.1, 3.2 e 3.3). As quantidades, aferidas com balança digital de precisão 0,01 g e acrescidas de cerca de 20%, foram homogeneizadas em uma bandeja até atingirem coloração uniforme, e pequenas porções foram coletadas para determinação experimental da umidade.

$$m_s = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h \cdot \rho_{d,max}}{4 \cdot (1 + \%_{cal})} \quad (3.1)$$

$$m_c = \%_{cal} \cdot m_s \quad (3.2)$$

$$m_w = w_{ot} \cdot (1 + \%_{cal}) \cdot m_s \quad (3.3)$$

Como não se dispõe na universidade de aparatos específicos para execução deste ensaio (compactador de CPs para ensaios Mini-MVC e molde cilíndrico próprio), um sistema teve de ser adaptado utilizando tubo de PVC; um molde metálico unipartido de CPs cimentícios, com as dimensões mencionadas; a estrutura de um compactador antigo (prensa fixa); e um extrator de amostras Proctor (FIGURA 3.6(a)), que permitiu a confecção de CPs (FIGURA 3.6(d)) com as misturas por compactação.

Este sistema consiste na suspensão manual hidráulica (FIGURA 3.6(c)) do conjunto molde-tubo-solo contra a prensa maciça. Anteriormente, o tubo de PVC, com diâmetro interno de 53,4 mm, teve tal dimensão alargada em uma das extremidades com calor do fogo até atingir o diâmetro externo do molde fechado, a qual foi afixado para funcionar como uma “extensão”

(FIGURA 3.6(b)), comportando o volume da mistura e impedindo sua extravasão. Com a suspensão do conjunto até uma altura previamente estabelecida, a prensa de formato cilíndrico adentra o tubo por completo e comprime a mistura úmida no interior do molde. A Figura 3.7, esquemática, ajuda a compreender melhor o sistema proposto.

Figura 3.6 – Moldagem dos corpos de prova para ensaio à compressão simples: (a) sistema compactador adaptado, cujo (b) conjunto molde-tubo-solo é prensado por (c) suspensão hidráulica manual para confeccionar (d) CPs cilíndricos de solo e solo-cal.



(a)



(b)



(c)

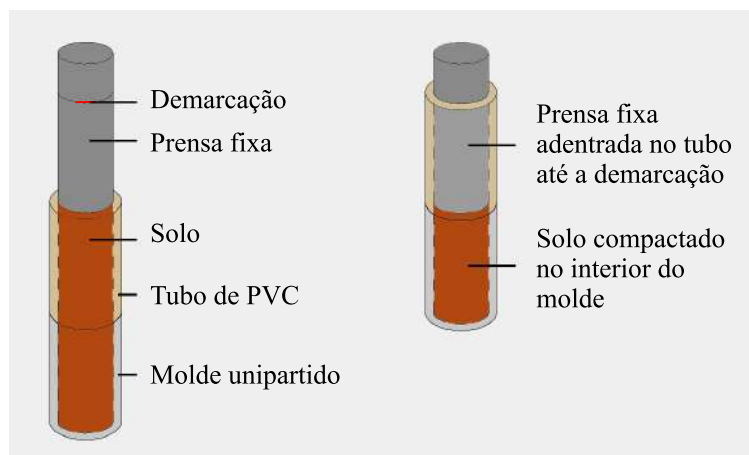


(d)

Fonte: Do autor (2019).

Entretanto, para solucionar o problema de cisalhamento lateral do solo no vão com a abertura do molde unipartido, o interior foi envolto com duas camadas de plástico filme de PVC, de espessura desprezível, que além de aliviarem as tensões, facilitaram sua retirada. Colocou-se

Figura 3.7 – Esquema de funcionamento do sistema compactador adaptado.



Fonte: Do autor (2019).

também papel filtro sobre o molde, para evitar perdas de massa no contato com o extrator de amostras Proctor.

Neste trabalho, buscou-se para cada teor de cal compactar os corpos de prova a nível ótimo de sua respectiva curva, representado pelas exigências técnicas de compactação em campo expressas nas Equações 3.4 e 3.5. Dentro do intervalo, um pouco mais de água foi adicionada à quantidade m_w das misturas solo-cal porque moldagens testes exatas tiveram extrações do molde bastante difíceis, com quebras de CPs frequentes neste processo, o que não ocorreu com o material mais úmido.

$$GC = \frac{\rho_d}{\rho_{d,max}} \geq 95\% \quad (3.4)$$

$$w_{ot} - 2\% \leq w \leq w_{ot} + 2\% \quad (3.5)$$

Após desmoldagem, as dimensões foram aferidas com um paquímetro analógico para devido controle de resultados e padronização. Tomaram-se 3 CPs para cada teor cujos diâmetro e altura diferiram até ± 1 mm do estabelecido e cujos parâmetros ρ_d e w diferiram menos que 2% da média aritmética de seus semelhantes. Acondicionou-os com plástico filme e sacos plásticos (FIGURA 3.8), identificados, para evitar perdas de umidade ao ar e foram armazenados em temperatura ambiente e ao abrigo do sol por 14 dias para cura.

3.4.4 Ensaio de resistência à compressão simples

Como inexistente uma norma brasileira que disponha sobre as diretrizes do ensaio de compressão simples para solos estabilizados quimicamente com cal, adotaram-se, neste trabalho, as

Figura 3.8 – Acondicionamento dos corpos de prova de solo e solo-cal.



Fonte: Do autor (2019).

prescrições técnicas da norma americana ASTM D5102-96 (ASTM, 2009), conforme também utilizada por Araújo (2009), Dalla Rosa (2009) e Cover (2016). As dimensões dos corpos de prova moldados, h e D , obedecem a relação de 2 : 1 exigida por tal documento.

Utilizou-se, neste ensaio, a prensa automática Máquina de Ensaio Universal, ilustrada na Figura 3.9(a), com funcionamento hidráulico e célula de carga com capacidade de 3 tf, locada no Laboratório de Materiais e Mecânica das Estruturas (Bloco I do Departamento de Engenharia). Nesta, os CPs foram submetidos à compressão até a ruptura (FIGURA 3.9(b)), decorridas as duas semanas de cura. O deslocamento, controlado, teve velocidade fixa de 1,14 mm/min, a mesma adotada por Dalla Rosa (2009) e Cover (2016).

Figura 3.9 – Execução do ensaio de resistência à compressão simples: submissão ao esforço mecânico em (a) prensa automática até a (b) ruptura do CP.



(a)



(b)

Fonte: Do autor (2019).

Não houve submissão dos CPs à imersão prévia 24 horas antes do ensaio mecânico para saturação, diferente do preconizado pela norma, porque corpos de prova testes moldados e imersos facilmente se desmancharam quando colocados num recipiente com água potável.

O tempo de cura escolhido, ou seja, período de execução deste ensaio após a realização das moldagens, foi de 14 dias por observância dos resultados de Lovato (2004) na Tabela 2.3, na qual percebe-se que, de todas as dosagens apresentadas, aquela que apresenta a maior das resistências sob cura de 14 dias também apresenta a maior das resistências sob cura de 28 dias, cujo efeitos da estabilização são notórios. Por questões de prazos do término deste trabalho, optou-se pelo mais curto.

Com os dados fornecidos pelo ensaio, pôde-se quantificar, conforme a norma NBR 12253 (ABNT, 2012), a RCS para cada ponto de dosagem (massa específica aparente seca, umidade e teor de cal similares) por meio da média aritmética das tensões de ruptura, admitindo-se valores situados a $\pm 10\%$ desta. Fora do intervalo admissível, a média é novamente determinada com os dois valores de menor diferença absoluta entre si e que satisfaçam tal critério.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização geotécnica do solo natural

Com os resultados de caracterização sintetizados na Tabela 4.1, classifica-se o solo como A-7-5 (IG = 12) pela Highway Research Board - HRB (ASTM, 2015), recebendo designação característica de solo argiloso com má qualidade para subleito, e como MH pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos - SUCS (ASTM, 2017), sendo um silte inorgânico de alta compressibilidade. A textura argilo arenosa e a considerável plasticidade são notórias.

Tabela 4.1 – Caracterização geotécnica do solo natural.

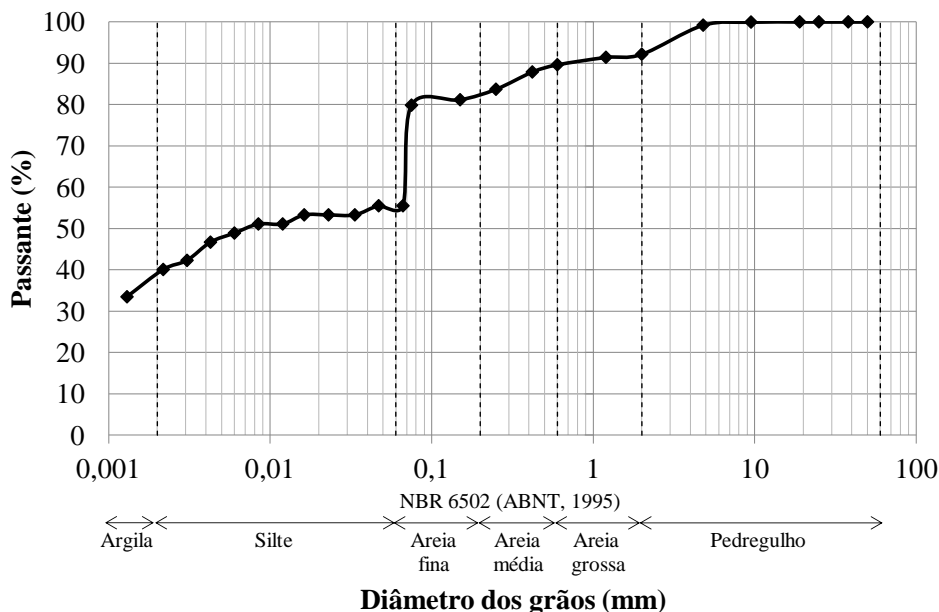
Massa específica dos sólidos ρ_s (g/cm ³)	Composição granulométrica conforme ABNT (1995) (%)				Limites de Atterberg (%)			Compactação	
	Argila	Silte	Areia	Pedregulho	LL	LP	IP	$\rho_{d,max}$ (g/cm ³)	W _{ot} (%)
2,76	39,3	16,2	36,7	7,8	51	40	11	1,42	30,6

Fonte: Do autor (2009).

Observa-se também que:

- A realização do ensaio de massa específica dos grãos de solo indicou que os sólidos da amostra possuem à temperatura de 20 °C densidade $\rho_s = 2,76 \text{ g/cm}^3$, média corrigida para duas determinações cujos valores diferiram menos que 0,009 dentre 10 repetições experimentais. O resultado encontrado é bastante aceitável, já que os solos, majoritariamente, não apresentam grandes variações do valor $2,75 \text{ g/cm}^3$ (PINTO, 2000);
- A amostra de solo na análise granulométrica feita por peneiramento e sedimentação em solução defloculante de hexametáfosfato de sódio apresentou a correspondente curva granulométrica (FIGURA 4.1). Nota-se, pelo seu formato, tendência à uniformidade central e à descontinuidade granulométrica do solo em questão. Os coeficientes C_u e C_c não puderam ser calculados para a devida confrontação, já que não constaram-se diâmetros tais que 30% ou 10% do peso seco do solo tenham partículas menores ou iguais a eles;
- Com a composição textural apresentada, majoritária em argila e areia (39,3% e 36,7%, respectivamente), e observância dos resultados obtidos pelos autores Ingles e Metcalf (1972), expostos nas Figuras 2.1 e 2.3, inferem-se baixos valores de resistências à compressão simples do solo natural, em comparação com as demais texturas. A análise

Figura 4.1 – Curva granulométrica.



Fonte: Do autor (2019).

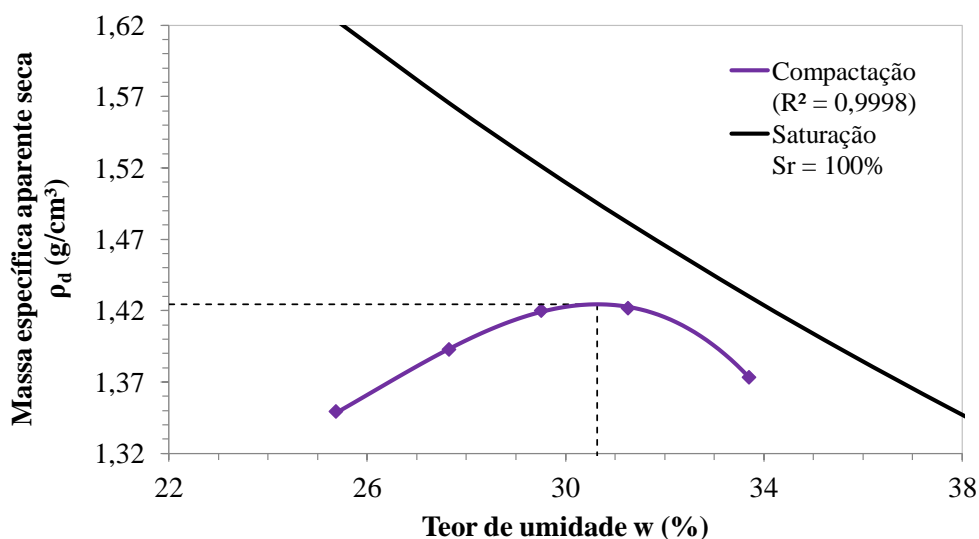
também se aplica às misturas solo-cal, que mesmo com teores ou tempos de cura maiores exibem RCS inferior à 800 kPa, valor excedido por argilas siltosas e pedregulhos arenosos estabilizados;

- d) Embora haja grandes diferenças entre os valores dos limites de Atterberg para solos finos, LP, LL e IP situam-se dentro das faixas estipuladas pela GRT (2015) para solos argilosos com predominância mineralógica de caulinitas, 30% a 40%, 35% a 72%, e 0 a 42%, respectivamente, o que permite deduzir, mas não afirmar, sua mineralogia;
- e) Crê-se que a estabilização com cal será satisfatória e eficaz, conforme as informações de Azevêdo (2010) e o critério da NLA (2004) expostos no Item 2.3.2, já que o solo apresenta mais de 25% de passante na peneira n.º 200, dentre os quais a porção de argila é significativa, e $IP \geq 10\%$ (com exatidão, 79,84% de passante e $IP = 11\%$);
- f) O limite e o índice de plasticidade (LP e IP) excedem, ainda, os valores máximos especificados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte para estradas revestidas. São estes, respectivamente, 25% e 6%, para o uso em camadas de base ou sub-base de pavimentos rígidos e flexíveis rodoviários (DNIT, 2006);
- g) Calculou-se um valor de índice de atividade superficial $A = 0,28$, razão de $IP = 11\%$ e da porcentagem de argila em peso de 39,3%. As partículas finas do solo são, portanto,

classificadas como inativas, e suas interações físicas e químicas com a cal são estimadas baixas;

- h) Da classificação HRB, nota-se que, devido ao mediano índice de grupo $IG = 12$, é dito que o solo possui entre sofrível a má qualidade para subleitos, o qual o valor é inversamente proporcional. O subgrupo A-7-5 caracteriza-se, ainda, por ser altamente elástico e sujeito a elevadas variações de volume (DNIT, 2006).
- i) Foram obtidos no ensaio de compactação, realizado sem o reuso de material, sobre amostras preparadas com secagem prévia até a umidade higroscópica, cilindro pequeno (Proctor) e energia normal, os valores de umidade ótima $w_{ot} = 30,6\%$ e massa específica aparente seca máxima $\rho_{d,max} = 1,42 \text{ g/cm}^3$, conforme a Figura 4.2, com auxílio de uma regressão polinomial cúbica. Estes resultados muito se assemelham aos encontrados por Dias Junior e Miranda (2000) para um latossolo de textura argilosa, também da região de Lavras/MG: $\rho_{d,max} = 1,43 \text{ g/cm}^3$ e $w_{ot} = 30\%$ (TABELA 3.1). Reforça-se a suposição, então, de que o solo estudado seja ou tenha similares amplamente comuns no município, no que se refere à ocorrência em jazidas;

Figura 4.2 – Curvas de compactação e saturação do solo natural.



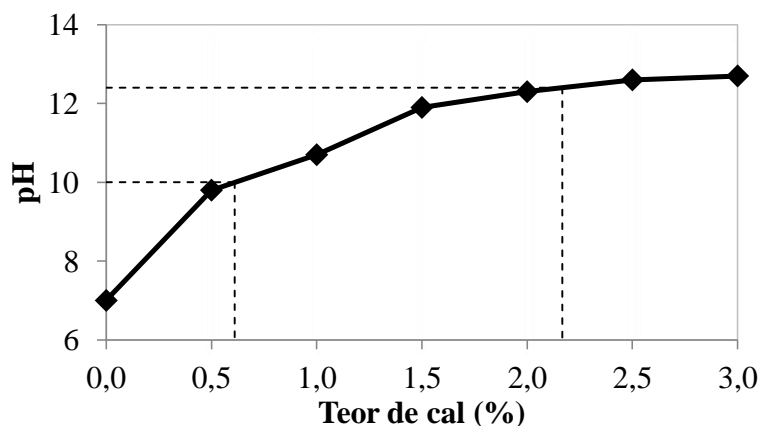
Fonte: Do autor (2019).

4.2 Dosagem

No ensaio de pH, anteriormente descrito, verificou-se que o solo natural possui caráter praticamente neutro ($pH \approx 7$) e que as misturas solo-cal são altamente alcalinas ($pH > 7$). Como

mostra a Figura 4.3, um valor superior ao recomendado pelo método, $\text{pH} = 12,4$, foi alcançado com a adição de 2,5% de cal (em relação à massa seca de solo). Entretanto, também percebe-se valores de pH superiores à 10, que garantem o acontecimento das reações pozolânicas (KAROL, 2003) e consequentes ganhos em resistência, com, no mínimo, 1,0% do estabilizante.

Figura 4.3 – Variação do pH com a adição de cal.



Fonte: Do autor (2019).

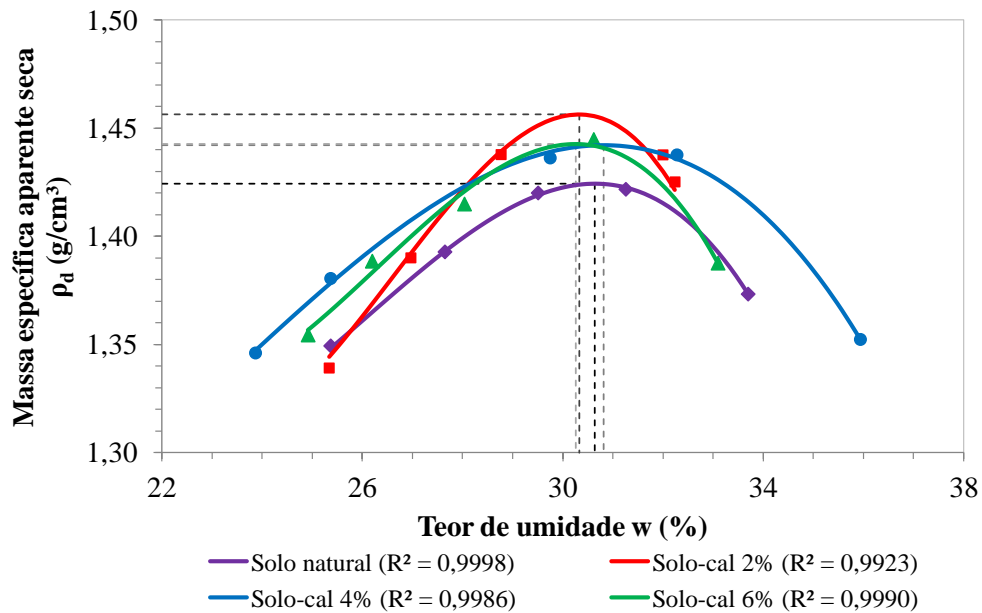
Logo, optou-se por análises mecânicas em solos com teores inteiros de cal em 2%, 4% e 6%, sendo os dois últimos propositais, aquém do recomendado, dado a incerteza citada do Método do pH para solos tropicais. As dosagens e os intervalos foram restringidos pela disponibilidade material de coleta e confecção manual dos corpos de prova para ensaio de compressão.

4.3 Compactação das misturas solo-cal

De forma semelhante ao ensaio de compactação com solo natural, as amostras solo-cal foram ensaiadas, agora com reuso de material, devido à limitação da quantidade coletada. Como resultado, são obtidas as curvas dispostas na Figura 4.4 por regressão cúbica, cujos valores ótimos são relacionados na Tabela 4.2. Opta-se, a partir deste momento, identificar os solos com teores de cal em 2%, 4% e 6% como “solo-cal 2%”, “solo-cal 4%” e “solo-cal 6%”, respectivamente, para síntese textual e fluidez das discussões futuras.

Notam-se, com base no solo sem estabilizante, crescimentos centesimais do $\rho_{d,max}$, com um pico no solo-cal 2% e valores constantes a partir do solo-cal 4%; e modificações decimais na w_{ot} , com ausência de qualquer tendência. Os dados não corroboram a literatura, que estabelece $\rho_{d,max}$ menores e w_{ot} maiores, cuja adição de cal floclula as partículas, aumentando o índice de vazios e a quantidade de água para preenchê-los (TRB, 1987 apud BARBOSA, 2013).

Figura 4.4 – Curvas de compactação das misturas solo-cal.



Fonte: Do autor (2019).

Tabela 4.2 – Características de compactação do solo natural e das misturas solo-cal.

Amostra	$\rho_{d,max}$ (g/cm ³)	w_{ot} (%)
Solo natural	1,42	30,6
Solo-cal 2%	1,46	30,3
Solo-cal 4%	1,44	30,8
Solo-cal 6%	1,44	30,3

Fonte: Do autor (2019).

Logo, esperavam-se curvas com ápices situados mais ao canto inferior direito, não obtidas neste ensaio, tendo como referência a curva do solo natural. Crê-se que a não correspondência aos fatos está atrelada ao reuso de material, que possibilita as trocas iônicas de floculação no tempo de espera entre a moldagem de um ponto e outro, diminuindo água disponível no sistema ao decorrer de sua execução (OSINUBI, 1998 apud BARBOSA, 2013).

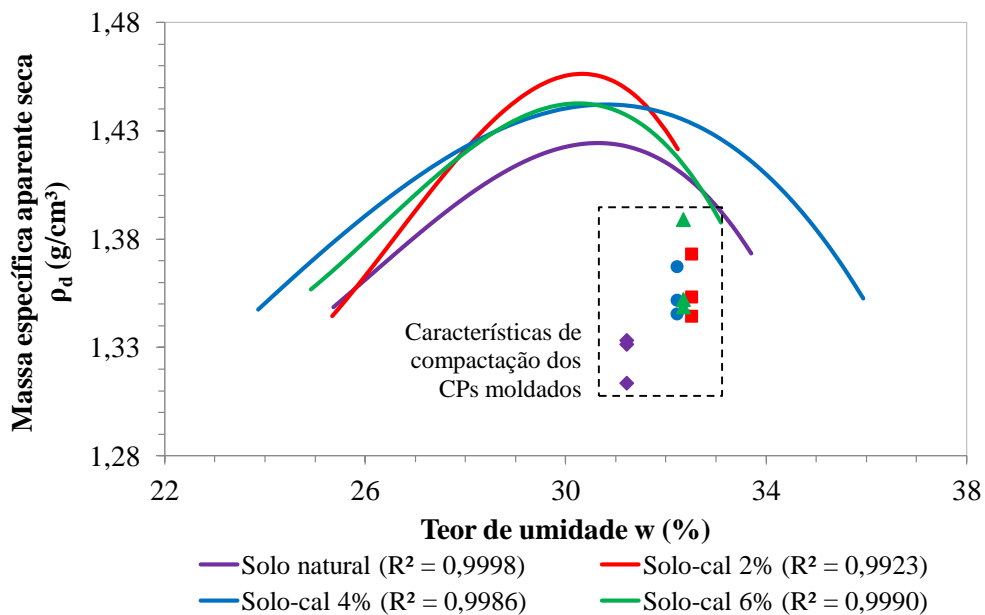
Entretanto, as máximas alterações encontradas são extremamente baixas, com cerca de 0,04 g/cm³ no $\rho_{d,max}$ (2,81%, relativamente) e -0,3% na w_{ot} (-0,01%, relativamente). O comportamento atípico também foi encontrado por Barbosa (2013) em seu trabalho: redução de 4,4% (28,51%, relativamente) na umidade ótima com a adição de 5% de cal.

4.4 Resistência à compressão simples

Os corpos de prova ensaiados à compressão axial simples têm as características de compactação indicadas graficamente na Figura 4.5.

Notam-se, a princípio, distanciamentos verticais dos pontos às curvas, que indicam graus de compactação inferiores à 100%. Das moldagens realizadas a nível ótimo da curva, apenas duas atingiram valores de $GC \geq 95\%$, conforme exigido para serviços geotécnicos; a média aritmética corresponde à 93,76%; e o menor valor encontrado é de 92,56%: dados indicadores de que o sistema compactador de CPs proposto não possui a eficiência adequada. Associa-se a isto uma força hidráulica insuficiente do extrator para compactar a mistura exatamente até a altura demarcada e às perdas de massa, cuja retenção é existente no tubo de PVC e na prensa fixa (FIGURA 4.6). Não conseguiu-se com plástico filme ou vaselina otimizá-las.

Figura 4.5 – Situação dos pontos de moldagem dos CPs nas curvas de compactação.



Fonte: Do autor (2019).

As características médias, apresentadas na Tabela 4.3 junto aos resultados dos testes de compressão, apresentam baixíssimas variações entre os teores de cal nas massas específicas aparente secas, situando-se entre um valor próximo à $1,35 \text{ g/cm}^3$. Variações mais significativas são notadas nos valores de umidade: a máxima diferença absoluta entre o maior e menor valor de w é de 1,29%, possuindo os conjuntos confeccionados teor de água aproximado de 32,1%. Não se descarta, então, a possibilidade de interferência deste parâmetro além do teor de cal nas alterações da propriedade mecânica.

Figura 4.6 – Retenção de massa da mistura na compactação dos corpos de prova: (a) no tubo de PVC e (b) na prensa fixa.



Fonte: Do autor (2019).

Tabela 4.3 – Resistência à compressão simples do solo natural e das misturas solo-cal moldados a nível ótimo de compactação e curados por 14 dias.

Material	CP	Características de compactação			RCS (kPa)	Acréscimo de RCS ao solo-cal 2% (%)
		w* (%)	ρ_d (g/cm ³)	GC (%)		
Solo natural	T01		1,338	93,95	72,90	
	T02	31,22	1,340	94,08	76,90	
	T05		1,320	92,69	104,08**	-
Média	-	-	1,333	93,87	74,90	
Solo-cal 2%	T21		1,377	94,54	46,67**	
	T22	32,51	1,348	92,56	73,18	
	T23		1,357	93,17	75,49	-
Média	-	-	1,361	93,19	74,33	
Solo-cal 4%	T41		1,370	94,99	172,29	
	T42	32,22	1,348	93,47	166,57	127,93
	T43		1,354	93,91	131,83**	
Média	-	-	1,357	94,27	169,43	
Solo-cal 6%	T61		1,340	92,90	197,61**	
	T62	32,35	1,344	93,14	159,40	94,91
	T63		1,380	95,68	130,37	
Média	-	-	1,355	94,08	144,88	

* Utilizou-se uma única mistura por teor de cal para as moldagens do CPs, daí a mesma umidade.

** Valor parcial não incluso na média aritmética, conforme critério estabelecido no Item 3.4.4.

Fonte: Do autor (2009).

Da análise dos resultados parciais do ensaio, não são observadas relações diretas entre o grau de compactação e os valores de RCS. Acreditava-se que o CP melhor compactado do conjunto teria a maior resistência dentre o mesmo, que, todavia, só ocorreu na amostras do solo-cal

4%. Além disto, o terceiro menor grau das moldagens, CP identificado como T61, apresentou a maior de todas as tensões aferidas, 197,61 kPa. A estas inconformidades atribuem-se possíveis erros de homogeneização da mistura ou de moldagem, dada a compactação inadequada, que pode ter sido desigual no comprimento vertical do corpo de prova, maiores na extremidade de contato com a prensa fixa.

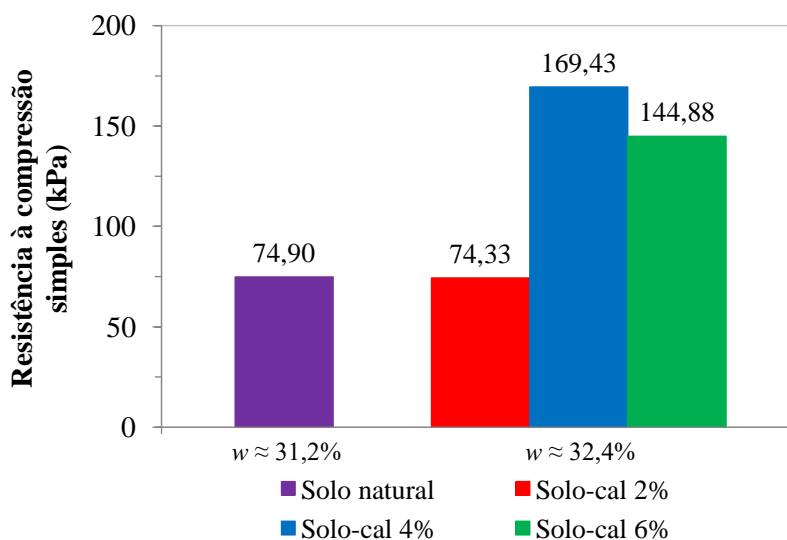
Os preceitos bibliográficos não respaldam, de fato, os resultados parciais. A observância de Lopes Junior (2007) em seu estudo refere-se às maiores ρ_d estarem relacionadas à maior efetividade do estabilizante de ação cimentante, que desenvolve RCS superiores. Segundo Ingles e Metcalf (1972), a diminuição da porosidade com a compactação é positiva pois, além de permitir maior contato e intertravamento entre partículas sólidas, favorece as reações químicas.

Apesar de apresentar umidade menor que as misturas solo-cal, cujo w aproxima-se de 32,4%, é notado, quanto ao resultado final do ensaio, que a adição de cal melhorou expressivamente a RCS do solo natural, determinada em 74,90 kPa. Como quantidades de água acima da w_{ot} diminuem o ρ_d , este valor tenderia a ser menor caso a umidade fosse a mesma, devido à estrutura apresentar mais vazios preenchidos pelo líquido, que por ser incompreensível concentra localmente as tensões e facilita a ruptura. Tal resistência, certamente, situar-se-ia abaixo do valor apresentado pelo solo-cal 2% e análises de ganhos mais exatas poderiam ser realizadas. Reitera-se que a compactação dos CPs com solo estabilizados demandaram mais água ($w \approx w_{ot} + 2\%$) por questões de desmoldagem.

Dos tratamentos propostos, o que apresentou maior RCS foi a mistura solo-cal 4%, com 169,43 kPa, valor 127,93% maior que a resistência do solo-cal 2%, próxima do solo natural em 74,33 kPa. O valor resultante da adição de 6% de cal também é significativo, em 144,88 kPa, cerca de 94,91% maior que o solo-cal 2%. Estes valores são comparados entre si porque a umidade das misturas solo-cal foram suficientemente próximas para desprezar nestas o efeito limitante da água na propriedade mecânica. A compreensão dos valores discutidos torna-se mais fácil com o gráfico de barras adiante (FIGURA 4.7).

Considerando que os valores da resistência à compressão tenham acréscimos lineares para baixos teores de cal, segundo a afirmação de Ingles e Metcalf (1972), calcula-se com os dados do solo-cal 2% e solo-cal 4% uma taxa constante de crescimento de $63,97\%/ \%_{cal}$. Tomam-se, para fins de comparação, os dados da Tabela 2.3 encontrados por Lovato (2004) aos 14 dias com adição de cal cálcica e dolomítica em solo A-6, com 38,4% de argila e 50,3% de areia, que resultam em taxas de $62,20\%/ \%_{cal}$ e $79,43\%/ \%_{cal}$, respectivamente (dados de 3% e

Figura 4.7 – Resistência à compressão simples do solo natural e das misturas solo-cal moldados a nível ótimo de compactação e curados por 14 dias.



Fonte: Do autor (2019).

4% em teor de cal), cuja primeira é bastante aproximada. A cal não é o único fator envolvido na estabilização para traçar uma relação qualquer, mas a similaridade torna os resultados encontrados neste trabalho bastante aceitáveis. Outras duas taxas determinadas para o mesmo tempo de cura são a de Behak (2013), $41,26\%/ \%_{cal}$ (dados de 3% e 4% em teor de cal), e a de Araújo (2009), $-1,33\%/ \%_{cal}$ (dados de 3% e 5% em teor de cal para amostra Am-A), incrementos menores. A comparação é restrita, visto que aferições neste tempo são incomuns, prevalecendo na literatura as de 28 ou 90 dias.

Da análise global dos dados, infere-se que resistências e incrementos muito maiores seriam observados em moldagens com umidades menores, próximo da w_{ot} , e GC próximo de 100%. Entretanto, a menor precisão de compactação exigida em campo, as quais os parâmetros encontrados se adéquam ou pouco distam, possibilita maior margem de utilização dos dados apresentados em obras geotécnicas. Irrefutavelmente, não descartam-se quaisquer estudos detalhados a serem feitos com o solo da região de Lavras/MG.

4.5 Parâmetros ótimos de dosagem e compactação

Em dimensionamentos empíricos de camadas de estradas pavimentadas, são utilizados os valores de resistência à compressão axial simples na análise de estabilizações dos materiais constituintes (ARAÚJO, 2009). É racional, portanto, em termos de engenharia geotécnica e de transportes, otimizá-la.

A resistência ótima das dosagens propostas, proveniente da adição de entre 4% do estabilizante químico, é determinada em 169,43 kPa. Dado o acréscimo significativo de RCS, acredita-se que o teor ótimo garante a estabilização do solo em questão. A realização do ensaio sob condições precisas de compactação elevada, de umidade ótima e de temperatura, com tempo de cura de 28 dias e imersão prévia, poderia, pelo Método de Thompson, validar esta hipótese, caso apresentasse ganhos superiores à 345 kPa. Entretanto, como certamente apresenta $\text{pH} > 12,4$ em solução, vide Figura 4.3, é dito favorável às ocorrências de reações pozolânicas por Eades e Grim (1966 apud ARAÚJO, 2009) e Karol (2003), indício do processo estabilizante.

Nota-se que o mesmo dista, em absoluto, cerca de 1,5% da dosagem indicada pelo Método do pH, o que reforça nem sempre fornecer a resistência ótima ou a não exatidão para aplicação em solos tropicais; e que situa-se dentro da margem citada pelos autores por Coelho, Torgal e Jaladi (2009), entre 3% e 10%, relacionadas a aspectos econômicos e de racionalização da construção.

Visando aplicação na camada superficial das estradas vicinais internas à Universidade Federal de Lavras, requer-se, junto à porcentagem de cal, os parâmetros massa específica aparente seca e umidade de compactação, dispostas na Tabela 4.2. A Tabela 4.4 sintetiza os valores ótimos resultantes da análise dos ensaios laboratoriais e os extrapola para uma situação de compactação em campo, cujo critério técnico de controle corresponde à $\text{GC} \geq 95\%$ e $w_{ot} - 2\% \leq w \leq w_{ot} + 2\%$, e cuja dosagem é acrescida de 0,5% a 1%, conforme recomendação de Thompson (1966 apud OLIVEIRA, 2010), para compensar problemas na homogeneização ou na construção.

Tabela 4.4 – Parâmetros ótimos de dosagem e compactação determinados para possível aplicação em estradas vicinais de Lavras/MG.

Parâmetro	Valores ótimos	Recomendações técnicas de campo
$\%_{cal}$ (%)	4,00	$4,50 \leq \%_{cal} \leq 5,00$
ρ_d (g/cm ³)	1,44	$\rho_d \geq 1,37$
w (%)	30,80	$28,80 \leq w \leq 32,80$

Fonte: Do autor (2019).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Constatou-se, à luz dos resultados da caracterização física inicialmente realizada, que cales são potenciais estabilizantes químicos para o solo estudado. Com os demais ensaios laboratoriais, verifica-se a influência direta de diferentes dosagens de cal nas características de compactação e nas propriedades mecânicas daquele. Enquanto as modificações nas curvas de compactação ocorreram de forma aleatória e não condizente com os levantamentos bibliográficos feitos, os acréscimos de resistência à compressão simples, previstos, demonstraram-se notórios e imediatos sob cura de 14 dias, mesmo não atingidas as características técnicas exigidas para campo nas moldagens com a sistema adaptado, cuja prensagem demonstrou-se ineficiente em reproduzir compactações Proctor. Além dos teores, inferiu-se a interferência dos parâmetros umidade e grau de compactação na RCS, que, respectivamente maiores e menores, subestimam as máximas tensões a serem alcançadas pela misturas solo-cal.

Integrando estas atividades práticas à problemática de Engenharia, conclui-se que os estudos de otimização de resistência desenvolvida pela adição de cal CH-I no solo de Lavras/MG, propriedade geotécnica de interesse em projetos de construções ou reparos de estradas, os quais demandam as vicinias internas da universidade, são capazes de fornecer valor de dosagem com adequação econômica e técnica. A metodologia literária de aferição de pH não foi suficientemente precisa em determiná-lo, entretanto, pode ser uma boa estratégia para iniciar o estudo de dosagem. Crê-se que tal teor, que demonstrou acréscimo mecânico expressivo, garante a estabilização do solo em questão, objetivada pelo trabalho.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Visto que desenvolvimento socioeconômico exigem melhores condições de tráfego e indicadores de qualidade para estradas vicinais, a continuidade da presente pesquisa faz-se necessária. Sugere-se, então, os potenciais estudos complementares com o solo estudado:

- Realização dos ensaios de resistência à compressão simples com misturas solo-cal sob cura de 7, 14, 28 e 90 dias, para avaliar a influência do tempo de cura e melhor embasar a viabilidade técnica da estabilização;

- Utilização de moldadores próprios ou desenvolvimento de um sistema mais eficiente para a confecção dos corpos de prova, buscando obtenção de maior controle das características de compactação, e conseqüentemente, dos resultados mecânicos obtidos;
- Repetição dos ensaios de compactação e de RCS, com teores de cal de 1%, 3%, 5% e superiores, para corroborar ou não o parâmetro ótimo de dosagem estimado;
- Determinação da dosagem ideal pelo Método de Thompson, não realizado devido ao desfazimento dos corpos de prova teste em imersão, para compará-la com o resultado disposto no Item 4.5;
- Realização de caracterização mineralógica e de análises químicas de soma de bases trocáveis, que identificaria ou quantificaria os argilominerais e as cargas negativas dos coloides do solo, respectivamente, para correlação com os resultados obtidos;
- Estabilização de outros solos do município de Lavras/MG e também com outros estabilizantes químicos, como o cimento, com a finalidade de comparação da máxima capacidade de suporte desenvolvida e dos incrementos de resistência com os teores, buscando otimização dos insumos materiais;
- Execução e monitoramento mecanístico de um trecho experimental, de pequeno comprimento, com o solo estabilizado em dosagem ótima de cal, para análises de desempenho como revestimento de estradas vicinais.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D5102-09**: Standard test method for unconfined compressive strength of compacted soil-lime mixtures. West Conshohocken, 2009. 7 p. Retirada em 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D3282-15**: Standard practice for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. West Conshohocken, 2015. 6 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D2487-17**: Standard practice for classification of soils for Engineering purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken, 2017. 10 p.
- ARAÚJO, A. F. **Avaliação de misturas de solos estabilizados com cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do estado do Ceará**. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) — Universidade do Ceará, Fortaleza, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12770:1992**: Solo coesivo — Determinação da resistência a compressão não confinada — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992. 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6502:1995**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7175:2003**: Cal hidratada para argamassas — Requisitos. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12253:2012**: Solo-cimento — Dosagem para emprego como camada de pavimento — Procedimentos. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457:2016 Versão corrigida:2016**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459:2016 Versão corrigida:2017**: Solo — Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016. 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180:2016**: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181:2016 Versão corrigida 2:2018**: Solo — Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016. 12 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7182:2016**: Solo — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016. 9 p.
- AZEVÊDO, A. L. C. d. **Estabilização do solo com adição de cal**: Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) — Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto, 2010.

BARBOSA, V. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal.** 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

BEHAK, L. **Análise estrutural de pavimentos de baixo volume de tráfego revestidos como solo modificado com cal considerando ensaios laboratoriais e monitoramento de trechos experimentais.** 266 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Civil) — Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

BENTO, P. F. **Uso da cal e fibras na melhoria de materiais para utilização em estruturas de pavimentos.** 116 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) — Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, 2006.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos.** 3. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2009.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). **ME 093/94: Solos — Determinação da densidade real.** Brasília, 1994. 4 p.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT). **Manual de pavimentação.** 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p. (IPR. Publ., 719).

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SGM). **Anuário estatístico do Setor de Transformação de Não Metálicos.** Brasília, 2018. 85 p. Versão preliminar.

CABALA, G. v. E. **Estudo do comportamento mecânico de estruturas de solo-cimento reforçado com fibras de coco e hastes de bambu.** 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

COELHO, A. Z. G.; TORRAL, F. P.; JALADI, S. **A cal na construção.** TecMinho, 2009. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1822/28972>>. Acesso em: 22 mar. 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Transporte rodoviário: desempenho do setor, infraestrutura e investimentos.** Brasília, 2017. 67 p.

CORRÊA, J. F. **Avaliações das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação.** 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

COVER, W. J. B. **Estabilização de solo residual de Dois Lajeados/RS com adição de cal.** 80 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2016.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas, Geotecnia e Fundações) — Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Braga, 2001.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal.** 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

- DIAS JUNIOR, M. d. S.; MIRANDA, E. E. V. d. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras (MG). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 24, n. 2, p. 337–346, 2000.
- EMMERT, F. **Avaliação do emprego de técnicas de estabilização de solos na melhoria de estradas florestais da região de Niquelândia-GO**. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) — Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.
- FERREIRA, R. d. C.; FALEIRO, H. T.; FREIRE, W. J. Desempenho físico-mecânico de solo argiloso estabilizado com cal e silicato de sódio visando aplicação em construções rurais. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 35, n. 3, p. 191–198, 2005.
- GLOBAL ROAD TECHNOLOGY (GRT). **Soil index properties**. [S.l.], 2015. Disponível em: <<https://globalroadtechnology.com/soil-index-properties/>>. Acesso em: 12 mar. 2019.
- GOOGLE Earth Pro. Versão 7.3.2.5495. Mountain View: Google LLC, 2018. Disponível em: <<https://www.google.com.br/earth/versions/#download-pro>>. Acesso em: 15 fev. 2019.
- GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: fundamentos e aplicações na Engenharia Civil**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2002.
- INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization: principles and practice**. Sidney: Butterworths, 1972.
- KAROL, R. H. **Chemical grouting and soil stabilization**. 3 ed. rev. e aum. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003.
- KESTLER, M. A. **Stabilization selection guide for aggregate and native-surfaced low volume roads**. Washington: U.S. Department of Agriculture (USDA), 2009. Disponível em: <<https://www.fs.fed.us/eng/pubs/pdf/08771805.pdf>>. Acesso em: 14 maio 2019.
- KLINSKY, L. M. G.; FURLAN, A. P.; FABBRI, G. T. P. Efeito da adição de areia de fundição e cal em algumas propriedades de solos argilosos. **Transportes**, v. 20, n. 1, p. 22–30, 2012.
- LITTLE, D. N. **Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates: Volume 1 — Summary of findings**. [S.l.], 1999. 89 p. Prepared for the National Lime Association (NLA). Disponível em: <<https://www.lime.org/publications/free-downloads/>>. Acesso em: 20 mar. 2019.
- LITTLE, D. N.; NAIR, S. **Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base materials**. Washington: The National Academies Press, 2009. Disponível em: <<http://nap.edu/22999>>. Acesso em: 17 mar. 2019.
- LOPES JUNIOR, L. S. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada**. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2004.

MALLELA, J.; QUINTUS, H. V. P. E.; SMITH, K. L. **Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design**. [S.l.], 2004. 36 p. Prepared for the National Lime Association (NLA). Disponível em: <<https://www.lime.org/publications/free-downloads/>>. Acesso em: 16 maio 2019.

NATIONAL LIME ASSOCIATION (NLA). **Lime-treated soil construction manual: lime stabilization & lime modification**. 11. ed. [S.l.], 2004. 41 f. Disponível em: <https://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/construct-manual2004.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2019.

NUNES, T. V. L. **Método de previsão de defeitos em estradas vicinais de terra com base no uso de redes neurais artificiais**: trecho de Aquiraz - CE. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação**. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

OLIVEIRA, E. d. **Emprego da cal na estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão**: estudo de caso no município de Ribeirão das Neves/MG. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

PAIVA, S. C.; GOMES, E. A. d. O.; OLIVEIRA, R. A. d. Controle de qualidade da cal para argamassas: metodologias alternativas. **Revista Ciências & Tecnologia**, ano 3, n. 1, p. 01–11, jul./dez. 2007.

PEREIRA, K. L. d. A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos**. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Natal, 2012.

PESSOA, F. H. C. **Análises dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário**. 151 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) — Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, 2004.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

SANTOS, J. d. **Estabilização de uma argila laterítica do Distrito Federal para uso em rodovias de baixo volume de tráfego**. 95 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) — Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

SERAFINI, L. et al. Resultados de pesquisa em estabilização alcalina realizada com materiais do norte do RS. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 4, n. 4, p. 1–11, 2004.

SILVA, E. d. **Mapeamento de solos e uso de algoritmos de aprendizagem em Lavras (MG)**. 194 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

SILVA, M. F. d. **Estudo comparativo de dois solos argilosos estabilizados com cal**. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) — Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Nova Lisboa, Lisboa, 2010.

SOUZA, C. M. A. d.; RAFULL, L. Z. L.; VIEIRA, L. B. Determinação do limite de liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 3, p. 460–464, 2000.

SOUZA, G. A. P. d.; CASTOR, G. H. **Avaliação da resistência de um solo fino estabilizado com lama de cal**. 59 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) — União de Ensino Superior de Viçosa, Faculdade de Ciências e Tecnologia de Viçosa, Viçosa, MG, 2016.

THE ENGINEERING COMMUNITY. **Lime & cement stabilisation process**. 2018. Disponível em: <<https://www.theengineeringcommunity.org/lime-cement-stabilisation-process/>>. Acesso em: 13 maio 2019.