

MATHEUS FRANCISCO DA SILVA



COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO-CAL:

ANÁLISE DE UM SOLO LATERÍTICO
E UM SOLO NÃO LATERÍTICO

 Atena
Editora
Ano 2023

MATHEUS FRANCISCO DA SILVA



COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO-CAL:

ANÁLISE DE UM SOLO LATERÍTICO
E UM SOLO NÃO LATERÍTICO

 Atena
Editora
Ano 2023

Editora chefe

Prof^a Dr^a Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2023 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2023 Os autores

Copyright da edição © 2023 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo do texto e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva do autor, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos ao autor, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Prof^a Dr^a Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Prof^a Dr^a Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Prof^a Dr^a Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Prof^a Dr^a Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profº Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabricio Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profº Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá
Profº Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco
Profº Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profº Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profº Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes
Profº Drª Natíeli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profº Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Profº Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Profº Dr Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá
Profº Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Comportamento mecânico de misturas solo-cal: análise de um solo laterítico e um solo não laterítico

Diagramação: Natália Sandrini de Azevedo
Correção: Yaiddy Paola Martinez
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: O autor
Autor: Matheus Francisco da Silva

| Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) | |
|---|--|
| S586 | Silva, Matheus Francisco da Comportamento mecânico de misturas solo-cal: análise de um solo laterítico e um solo não laterítico / Matheus Francisco da Silva. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2023. |
| | Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-258-1248-9 DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.489232303 |
| | 1. Solos - Análise. I. Silva, Matheus Francisco da. II. Título. CDD 631.41 |
| Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166 | |

DECLARAÇÃO DO AUTOR

O autor desta obra: 1. Atesta não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao conteúdo publicado; 2. Declara que participou ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certifica que o texto publicado está completamente isento de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirma a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhece ter informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autoriza a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

Este trabalho é parte do projeto de pesquisa intitulado 'Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico', realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Aos meus pais, Fátima e Clemente.

APRESENTAÇÃO

Embora a estabilização de solos com cal seja uma técnica mundialmente aplicada em obras geotécnicas e de pavimentação, a padronização de métodos e procedimentos relacionados à dosagem e execução de obras com solo-cal está distante de atingir um consenso, uma vez que variações de materiais e condições climáticas podem impactar os resultados de maneira significativa. Sendo assim, é imprescindível que os estudos sobre solo-cal estejam em constante atualização. É papel deste trabalho, portanto, oferecer uma perspectiva técnica sobre o comportamento de dois solos tropicais, coletados no mesmo perfil de talude, quando estabilizados com quantidades específicas de uma cal comercial. Adicionalmente, o trabalho visa apresentar resultados que corroborem a iminente necessidade de desenvolver protocolos de dosagem específicos para solos de regiões tropicais.

| | |
|---|-----------|
| LISTA DE SÍMBOLOS | 1 |
| LISTA DE SIGLAS | 2 |
| RESUMO | 3 |
| INTRODUÇÃO | 4 |
| Objetivos | 5 |
| Estrutura do trabalho | 5 |
| CONTEXTUALIZAÇÃO..... | 6 |
| Solos..... | 6 |
| Estabilização de solos | 7 |
| A cal e suas reações com os solos | 9 |
| Dosagem da cal no solo | 13 |
| Comportamento dos solos estabilizados com cal | 13 |
| MATERIAIS E MÉTODOS | 17 |
| Solos..... | 17 |
| Coleta e preparação | 17 |
| Caracterização dos solos..... | 17 |
| Cal..... | 21 |
| Dosagem..... | 21 |
| Compactação dos corpos de prova | 22 |
| Resistência à compressão simples | 24 |
| Resistência à tração por compressão diametral | 26 |
| Imersão dos corpos de prova de RCS e RT | 27 |
| Análise estatística para RCS e RT | 28 |
| ENSAIOS PRELIMINARES..... | 30 |
| Caracterização das misturas | 30 |
| Dosagem da cal no solo | 30 |
| Ensaio de compactação Proctor | 31 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| Propriedades físicas..... | 33 |
| APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS..... | 35 |
| Resistência à compressão simples | 35 |
| Módulo tangente a 50% de RCS..... | 39 |
| Resistência à tração por compressão diametral | 41 |
| Considerações finais | 46 |
| CONCLUSÕES..... | 48 |
| Sugestões para pesquisas futuras | 48 |
| REFERÊNCIAS | 50 |
| APÊNDICES..... | 54 |
| Apêndice A..... | 54 |
| Apêndice B | 57 |
| Apêndice C..... | 60 |
| SOBRE O AUTOR | 63 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------------|--|
| Ca | Cálcio |
| CaCO_3 | Carbonato de cálcio |
| CaO | Óxido de cálcio |
| $\rho_{\text{dmáx}}$ | Massa específica seca máxima |
| ρ_d | Massa específica seca |
| ρ_s | Massa específica dos sólidos |
| w_o | Umidade ótima |
| # | Número de peneira |
| % | Porcentagem |
| Pi | Perda de massa por imersão |
| c' | Argilosidade dos solos |
| e' | Caráter laterítico |
| $E_{T,50\%}$ | Módulo tangente a 50% da tensão de ruptura |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|--------|--|
| AASHTO | <i>American Association of State Highways and Transportation Officials</i> |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| CSH | Silicato Hidratado de Cálcio |
| DER | Departamento de Estradas de Rodagem |
| DNER | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem |
| EDX | Espectrometria de Difração de Raios-X |
| GC | Grau de compactação |
| HRB | <i>Highway Research Board</i> |
| IP | Índice de plasticidade |
| LG' | Solo argiloso laterítico |
| LL | Limite de liquidez |
| LP | Limite de plasticidade |
| MCT | Miniatura Compactado Tropical |
| NG' | Solo argiloso não laterítico |
| RBVT | Rodovia de Baixo Volume de Tráfego |
| RCS | Resistência à compressão simples |
| RT | Resistência à tração por compressão diametral |
| SP | São Paulo |
| TRB | <i>Transportation Research Board</i> |
| TS | <i>Tensile Strength</i> |
| UCS | <i>Unconfined compressive strength</i> |
| USCS | <i>Unified Soil Classification System</i> |

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento de dois solos estabilizados com cal hidratada (CH-III), um solo laterítico (LG') e outro não laterítico (NG'), coletados em um mesmo local na cidade de Dois Córregos-SP. Para tanto, foram realizados os procedimentos de dosagem de Solo-Cal do Método do pH (ASTM D 6276-99a), que resultou nos teores de 4% de cal, para o solo LG' e de 6%, para o solo NG'. No programa experimental foram avaliadas as propriedades mecânicas (RCS e RT) originais e após imersão para diferentes dias de cura (0, 7, 28 e 60 dias). Os resultados dos ensaios permitiram verificar que (i) a parcela mais importante do ganho de resistência (RCS e RT) devido à adição de cal aconteceu nos primeiros sete dias de cura e após os 28 dias, há uma tendência de estabilização do ganho de resistência, contudo, nenhuma das misturas superou as RCS e RT do solo original e (ii) os resultados dos ensaios de RCS e RT em corpos de prova após imersão só foram possíveis nas misturas solo-cal (a partir de 7 dias) indicando que parcela dessas resistências são atribuídas à cimentação desenvolvida entre o solo e a cal. Os resultados desta pesquisa levantam questões sobre o método de dosagem e a possibilidade da cal estar carbonatada. Essas questões evidenciam a necessidade de se desenvolver uma normatização dos métodos de dosagem e avaliação das misturas solo-cal adequados para aplicação aos solos tropicais.

PALAVRAS-CHAVE: Dosagem de solo-cal; Solos tropicais; Resistência à compressão simples; Resistência à tração.

INTRODUÇÃO

A pavimentação é uma atividade potencialmente consumidora de recursos naturais como o solo, os agregados e o asfalto. Esses materiais são normalmente empregados como materiais de construção. Dentre eles, os solos, em especial, podem ser empregados em camadas de reforço de subleito, sub-base e/ou base de pavimentos, desde que atendam a exigências mínimas.

Como as obras rodoviárias estão sujeitas a uma variação de materiais no mesmo projeto, reflexo de sua característica de obra linear, é comum encontrar-se materiais marginais que não atendam às exigências para aplicação no pavimento. Os esforços para tornar esses materiais tecnicamente viáveis levaram ao desenvolvimento e aplicação de métodos de estabilização de solos.

Um dos métodos de estabilização utilizado na pavimentação é a estabilização química, que ocorre através da inserção de um aditivo ao solo, conferindo-lhe melhorias em suas propriedades de engenharia. Os aditivos mais utilizados na pavimentação brasileira são o cimento Portland e a cal hidratada.

A estabilização de solos com cal é processada a partir de mecanismos de trocas catiônicas, aglomeração e floculação, e reações pozolânicas. Essas reações são responsáveis por mudanças texturais, de trabalhabilidade e de resistência na mistura solo-cal. Propriedades de compactação como $\rho_{dmáx}$ e w_o também são alteradas quando a cal é adicionada ao solo, resultando em reduções no valor de $\rho_{dmáx}$ e acréscimos no valor de w_o .

No que diz respeito às propriedades mecânicas do solo, a estabilização com cal geralmente leva a incrementos de resistência que, no entanto, podem estar condicionados a alguns fatores como o teor de cal, o tempo e as condições de cura. No que tange ao teor de cal, parece haver um teor ótimo a ser adicionado, acima do qual a cal passa a atuar como finos, reduzindo a resistência da mistura. Quanto ao tempo de cura, as reações pozolânicas atuam melhorando a resistência da mistura em médio e em longo prazo. A temperatura, fator importante das condições de cura, acelera o ganho de resistência das misturas em função de seu aumento (DIAMOND & KINTER, 1965; THOMPSON, 1966; MOLINA *et al.*, 2004).

A adição de cal ao solo também influencia em propriedades como módulo de resiliência e deformação permanente dos solos. Misturas de solo-cal apresentam aumentos consideráveis no módulo de resiliência devido ao enrijecimento proporcionado pelas reações pozolânicas. Tal enrijecimento conjuntamente com reduções no índice de plasticidade (IP) das misturas resultam em um decréscimo na deformação permanente (SVENSON, 1981; PUPPALA *et al.*, 1996; LITTLE, 1999; YUSUF *et al.*, 2001; SOLANKI *et*

al., 2010).

Por ser uma técnica de estabilização com abrangência global, existem muitos procedimentos desenvolvidos com o propósito de estimar a porcentagem necessária de cal a ser adicionada aos solos. Entretanto, essa diversidade de métodos não converge a uma normalização de um procedimento que conteplete todos os tipos de solos. Procedimentos desenvolvidos em países com solos de clima temperado são utilizados em países com solos tropicais, como é o caso do Brasil. Essa prática de não considerar particularidades que os solos tropicais apresentam pode acarretar em teores de cal que não representam o teor ótimo necessário ao solo, levando ao descarte de um material que apresentaria desempenho mecânico adequado.

OBJETIVOS

A pesquisa tem como objetivo geral entender como solos lateríticos e não lateríticos se comportam quando estabilizados com cal. Adicionalmente, os objetivos específicos são: i) empregar o método de dosagem do pH (normatizado pela ASTM D 6276) na estabilização de solos com cal; ii) identificar a eficiência da cal na estabilização de solos lateríticos e não lateríticos; iii) compreender a importância do tempo de cura no ganho de resistência das misturas e iv) entender o efeito deletério da água na integridade das misturas solo-cal.

ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos. No primeiro capítulo encontra-se a introdução do tema estudado, bem como os objetivos buscados pela pesquisa. O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema, como uma síntese de pesquisas anteriores. O terceiro capítulo compreende a escolha dos materiais e dos métodos empregados. No quarto capítulo é realizada a apresentação de ensaios preliminares e definitivos. O quinto capítulo apresenta os resultados dos ensaios da pesquisa, conjuntamente com suas análises. O sexto capítulo é destinado às principais conclusões da pesquisa e também a algumas sugestões para pesquisas futuras.

CONTEXTUALIZAÇÃO

SOLOS

Solos são materiais compostos de partículas minerais, herdadas da rocha matriz, que ocorrem nas camadas superficiais da crosta terrestre (TERZAGHI & PECK, 1962; WINTERKORN & FANG, 1991). As partículas minerais apresentam-se soltas ou fracamente unidas, com vazios ocupados por água e/ou ar, portanto, trata-se de um material não consolidado, que exibe comportamentos peculiares em função de sua composição mineralógica (CRAIG, 2004).

A composição mineralógica de um solo, dentre outros fatores, depende do seu processo de formação, ou seja, do tipo de intemperismo sofrido, por isso algumas variações e peculiaridades são resultados da ação do clima da região em que o solo está situado. (NOGAMI & VILLIBOR, 1983). Em regiões de clima temperado, por exemplo, o processo predominante é o intemperismo físico, assim sendo, a formação dos solos ocorre principalmente pela ação de gelo e degelo da água que permeia as rochas, ocasionando, com o tempo, a quebra da superfície rochosa em partículas menores. Por isso, é comum que os solos dessas regiões apresentem um perfil pouco espesso.

Nas regiões de clima tropical úmido, onde há a combinação de alta temperatura e alto nível pluviométrico, o intemperismo predominante é o químico. A desagregação da rocha-matriz é processada principalmente por reações químicas promovidas em presença de água, o que resulta em perfis de solos mais espessos, em partículas menores e em peculiaridades de comportamento de interesse geotécnico.

No Brasil, Nogami e Villibor se dedicaram, a partir dos anos 1970, em entender o comportamento dos solos tropicais, o que resultou na pesquisa de um grande número e variedade de solos e na construção de grandes extensões de trechos experimentais, culminando nas bases metodológicas de classificação dos solos tropicais, onde se diferenciam duas grandes classes de comportamento, as dos solos lateríticos e a dos solos não lateríticos (NOGAMI & VILIBOR, 1995).

Solos lateríticos ocorrem em locais de clima tropical úmido e em condições bem drenadas, estão presentes em quase todas as regiões do Brasil, em diferentes condições de clima, topografia e formações geológicas. Esses solos ocupam as partes mais superficiais do perfil, com camadas que acompanham a superfície do terreno.

É comum que os solos lateríticos apresentem coloração típica amarelada ou avermelhada, esta característica é resultante do processo de formação. Na formação dos solos lateríticos, os compostos químicos mais leves são levados pela ação da água, restando principalmente óxidos hidratados de ferro e alumínio, que proporcionam coloração

típica ao solo. O quartzo é um elemento frequente na fração areia, assim como outros minerais resistentes às intempéries e mecanicamente. Em sua fração argila, apresentam-se argilo-minerais da família da caulinita em uma estrutura característica denominada de estrutura de pipoca (NOGAMI & VILLIBOR, 1983).

Solos não lateríticos são formados a partir da desagregação e/ou decomposição *in situ* de uma rocha, mas eles se encontram sempre subjacentes a uma camada de outro tipo genético. Suas camadas possuem formas oriundas da estrutura da rocha-matriz, portanto, ao contrário dos solos lateríticos, podem ocorrer em camadas mais profundas do perfil. Estes solos apresentam cores diversas, herdadas da rocha-matriz ou do processo de intemperismo. Possuem constituição mineralógica muito variada, com a presença de minerais não estáveis ao intemperismo tropical na fração areia (ex.: mica e feldspato), e minerais expansivos da família da ilita e da montmorilonita na fração argila (NOGAMI & VILLIBOR, 1983).

A Figura 2.1 apresenta a designação genética de ocorrência das camadas de solos tropicais.

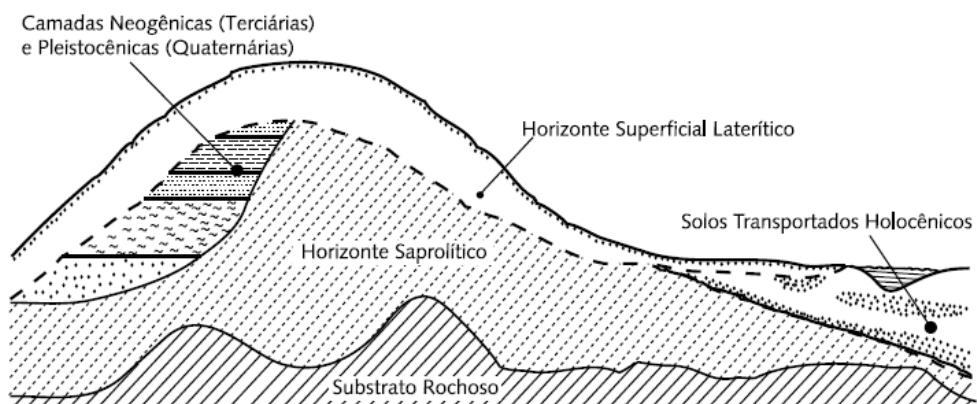


Figura 2.1. Designação genética de ocorrência das camadas de solos tropicais (VILLIBOR & NOGAMI, 2009)

ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

As obras de pavimentos estendem-se por muitos quilômetros, por isso, não raro são enfrentados problemas de projetos como a ocorrência de solos variados, inclusive os de características indesejáveis. A viabilidade de utilização de solos locais na construção de rodovias pode considerar algum tipo de tratamento que os torne adequados para dada função. Como consequência da iniciativa de consumir os materiais locais, observam-se benefícios como a redução de explorações de novas jazidas e economia nos gastos

relativos ao transporte de materiais.

Na pavimentação, a estabilização de solos é uma técnica utilizada para modificar e melhorar um solo que não apresenta um desempenho aceitável. As propriedades de resistência e compressibilidade do solo original são alteradas a partir de um processo físico ou químico, a fim de criar um novo material que atenda de uma forma melhor aos requisitos do projeto de dado local (INGLES & METCALF, 1972; SANTANA, 1983).

A estabilização de solos pode ser dividida em duas classes: física e química. A estabilização física de solos é o processo de melhoria de suas características e propriedades originais por meio da alteração da densificação do solo por esforços de compactação ou por meio da adequação da granulometria com a mistura de outros solos, tornando o contato grão-grão mais efetivo.

Já a estabilização química é o termo que engloba todos os processos onde as interações químicas são predominantes, independentemente do tipo de aditivo incorporado. São métodos de tratamento em que um ou mais compostos químicos são adicionados ao solo, resultando em reações químicas entre os constituintes do solo e os aditivos (WINTERKORN & PAMUKCU, 1991).

Outrossim, pode ser entendida como a técnica de conferir ao solo acréscimos de rigidez, melhora da trabalhabilidade e redução da expansão, pela inserção de compostos quimicamente ativos. A técnica é aplicada para que o produto da estabilização possa atender às propriedades de engenharia que o solo natural não era capaz de apresentar (LIMA, 1981; BERNUCCI *et al.*, 2008; LITTLE & NAIR, 2009).

Há uma grande variedade de aditivos químicos utilizados na estabilização de solos, e cada um pode proporcionar modificações em características dos solos de acordo com mecanismos peculiares de ação. No entanto, em geral, quando se trata de estabilização química destacam-se quatro mecanismos: substituição das moléculas de água e cátions, melhoria das ligações entre os agregados das partículas argilosas, floculação e dispersão (LIMA, 1981).

Os principais estabilizantes químicos utilizados nos solos é o cimento Portland e a cal hidratada. O cimento confere ao solo ganho de resistência imediata e ao longo do período de cura (28 dias), em função do processo de formação de componentes e da hidratação do cimento. Os efeitos de sua utilização se apresentam como aumento da resistência da mistura, redução da plasticidade do solo, melhora da trabalhabilidade e redução da variação volumétrica (expansibilidade e compressibilidade). O ganho de resistência pode ser mais rápido, quando a mistura é exposta a temperaturas mais altas, entretanto, a secagem pode comprometer a hidratação do cimento. A estabilização com cimento Portland pode ser indicada para uma grande diversidade de solos, mas sua aplicação mais comum é

destacadamente aos solos granulares (INGLES & METCALF, 1972; LITTLE & NAIR, 2009; EREN & FILIZ, 2009).

A estabilização com cal confere alterações aos limites de consistência do solo, melhorando sua trabalhabilidade. Também é responsável por acréscimos de resistência da mistura em curto e longo prazo, devido aos seus mecanismos de reação com o solo. Diferentemente do solo-cimento, as misturas estabilizadas com cal geralmente apresentam ganhos de resistência durante longos períodos de cura. Essa peculiaridade é atribuída às reações pozolânicas no solo-cal, que costumam ser processadas em tempos mais longos. A aplicação dessa técnica é mais eficiente em solos de granulometria fina, pois as alterações de textura e a cimentação das partículas do solo é resultado da reação da cal com os argilominerais presentes na parcela fina da granulometria.

Outro produto que tem merecido destaque em estabilização de solos é a cinza volante. Em alguns países da América e da Europa, a cinza volante é considerada um rejeito industrial e suas propriedades podem variar de acordo com o tipo de carvão utilizado ou com o processo de queima. Geralmente, a cinza volante é classificada em dois tipos: C ou F. As cinzas volantes pertencentes à classe C possuem propriedade autocimentante devido à considerável presença de CaO livre. Parte da mistura solo-cinza volante classe C apresenta processo de hidratação semelhante ao do solo-cimento, enquanto a outra parte apresenta reações pozolânicas.

O uso de cinzas volantes da classe C pode aumentar a resistência, rigidez e durabilidade dos solos estabilizados. Já as cinzas volantes classe F, por não apresentarem quantidade satisfatória de CaO livre, dependem da adição de outro aditivo com característica cimentante para a estabilização dos solos (MISRA, 1998; LITTLE *et al.*, 2000).

Outros tipos de estabilizantes utilizados em solos são os rejeitos industriais. Alguns resíduos apresentam uma boa interação com o solo, quando misturados, outros são mais efetivos com a presença de um agente cimentante (cimento Portland ou cal). As pesquisas e a diversidade de resíduos são numerosas, mas, pode-se citar trabalhos como o de Bueno (1996), com misturas de solo-vinhoto (resíduo da indústria açucareira), e também o de Silva Júnior (2010), com misturas de solo-cal e resíduos da fabricação de papel.

A CAL E SUAS REAÇÕES COM OS SOLOS

A adição de cal ao solo para a melhoria de suas propriedades é uma técnica largamente difundida, apresentando-se em numerosas pesquisas e aplicações ao redor do mundo. No Brasil, esta técnica vem sendo executada e estudada há alguns anos. Pesquisas sobre o comportamento de trechos experimentais construídos com camada de solo-cal demonstraram a sua viabilidade, como é o caso dos trechos experimentais

estudados por Corrêa (1989) e Lovato (2004), onde misturas de solo-cal continuaram a apresentar durabilidade adequada ao longo do tempo.

A cal é o principal produto derivado das rochas carbonatadas cálcio-magnesianas. Estas rochas são submetidas à decomposição térmica (calcinação), reação química reversível pela qual a cal é obtida (GUIMARÃES, 1997). As reações de calcinação são representadas nas equações (2.1) e (2.2).



O óxido de cálcio produzido na calcinação das rochas carbonatadas cálcio-magnesianas é denominado de cal virgem (CaO). Quando submetida à hidratação, a cal virgem dá origem à cal hidratada (Ca(OH)_2) em uma reação que libera calor. Dependendo da rocha de origem, a cal hidratada pode ser formada por uma parcela de hidróxidos de cálcio, hidróxidos de magnésio e de uma pequena parcela de impurezas. Os tipos de cales obtidos são apresentados na Tabela 2.1.

| Composição química | Nomenclatura |
|---|-------------------------------|
| CaO | Cal cálcica virgem |
| CaO.MgO | Cal dolomítica virgem |
| Ca(OH)_2 | Cal cálcica hidratada |
| $\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{MgO}$ | Cal dolomítica mono-hidratada |
| $\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{Mg(OH)}_2$ | Cal dolomítica bi-hidratada |

Tabela 2.1. Tipos de cales

Os hidróxidos formados podem diferir em tamanho, forma, número, área superficial e distribuição granulométrica, influenciando em suas características e comportamento. Essa variedade de hidróxidos produzidos é atribuída aos vários métodos de hidratação e aos diferentes modelos de equipamentos de hidratação e tipos de cal virgem (GUIMARÃES, 1997).

Quando a cal é adicionada e misturada ao solo, dá-se início a uma sequência de reações químicas, que resultam em alterações imediatas. Outras reações são processadas mais lentamente, o que atribui à estabilização de solos com cal uma parcela de ganho de resistência imediato e outra ao longo do tempo.

As reações podem ser divididas em quatro grupos de mecanismos de atuação da cal no solo: trocas catiônicas, floculação e aglomeração, carbonatação e reações pozolânicas

(THOMPSON, 1966).

As trocas catiônicas que ocorrem nos solos obedecem à série liotrópica (de íons) apresentada por Grim (1953), onde se assume concentrações iguais: $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Ca}^{++} < \text{Mg}^{++}$. Desta forma, os cátions situados mais à esquerda da série liotrópica são substituíveis pelos cátions à direita, bem como cátions monovalentes tendem a ser substituídos por cátions multivalentes.

Com a adição de cal ao solo, uma concentração de cátions Ca^{++} livre é criada. Se a quantidade de cal for suficiente, os cátions Ca^{++} irão substituir os cátions metálicos mais fracos adsorvidos na superfície coloidal (THOMPSON, 1966; TRB, 1987; MALLELA *et al.*, 2004). Este fenômeno acarretará em uma redução do tamanho da camada difusa de água, fazendo com que as partículas de argila se aproximem mais (MALLELA *et al.*, 2004). Uma esquematização das trocas catiônicas é apresentada na Figura 2.2. Em geral, atribui-se às reações de trocas catiônicas melhorias na plasticidade, trabalhabilidade e resistência do solo.

A reação de floculação e aglomeração, como o próprio nome antecipa, torna o solo visivelmente diferente do original porque há mudanças na textura, que acontecem devido à aglutinação das partículas finas do solo, formando espécies de “agregados” com dimensões maiores (TRB, 1987; MALLELA *et al.*, 2004).

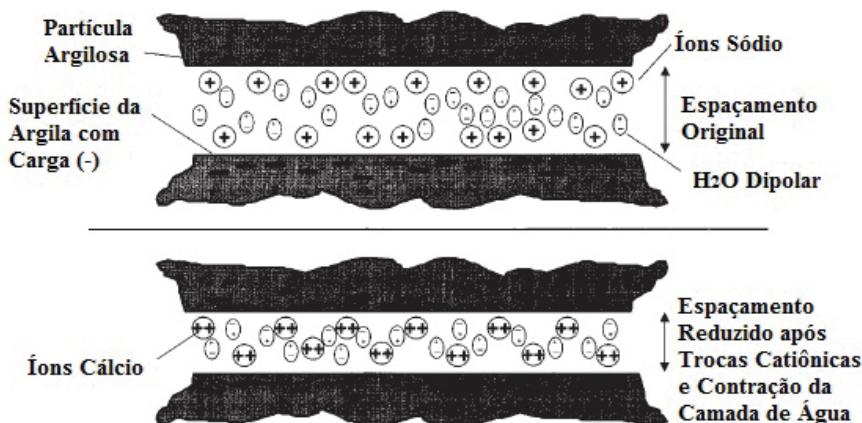


Figura 2.2. Trocas catiônicas (PRUSINSKI & BHATTACHARJA, 1999)

Segundo Herzog e Mitchell (1963)¹ *apud* Thompson (1966), o fenômeno de floculação e aglomeração é causado pelo aumento da concentração eletrolítica da água intersticial

1. HERZOG, A.; MITCHELL, J. K. Reactions Accompanying the Stabilization of Clay with Cement. *Highway Research Record*. N 36. Washington, US: Highway Research Board, 1963.

e pelo cálcio adsorvido na superfície das partículas de argila, contribuindo também para melhorias na plasticidade, trabalhabilidade e resistência do solo. A Figura 2.3 ilustra o processo de floculação e aglomeração de partículas argilosas.

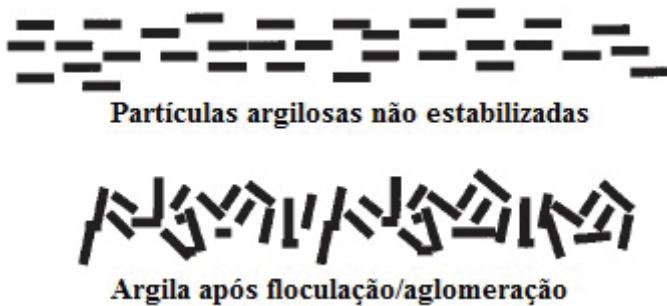


Figura 2.3. Aglomeração e floculação (PRUSINSKI & BHATTACHARJA, 1999)

Assim, em função do tempo reduzido necessário para que as trocas catiônicas e as reações de floculação e aglomeração aconteçam, depreende-se que no manuseio do solo-cal as primeiras mudanças de texturas observadas sejam decorrentes desses fenômenos.

As reações pozolânicas podem ser descritas como reações que ocorrem entre cal, água e a sílica e/ou alumina presentes no solo, formando compostos cimentantes. A reação ocorre quando a cal é adicionada ao solo em quantidade suficiente, tornando a mistura alcalina (pH em torno de 12) e ao mesmo tempo fornecendo cátions Ca^{++} livres. O pH da mistura solubiliza a sílica e a alumina da superfície das partículas argilosas, deixando-as disponíveis para reagir com o cálcio livre, resultando na formação de silicatos, aluminatos e aluminosilicatos hidratados de cálcio (TRB, 1987; LITTLE, 1995; GUIMARÃES, 1997).

Os compostos formados consolidam-se, cimentando partículas de argila vizinhas. Como efeito das reações pozolânicas no solo tem-se um aumento na resistência e na durabilidade. As reações pozolânicas apresentam desenvolvimento contínuo, por um longo período de tempo, desde que o pH seja alcalino e os cátions Ca^{++} estejam disponíveis. Dentre os fatores que influenciam as reações pozolânicas no solo, podemos citar: teor de matéria orgânica, quantidade excessiva de sódio permutável, mineralogia da fração argila, temperatura, presença de sulfatos, ferro livre, drenagem natural e relação sílica-alumínio do solo (LITTLE, 1995; GUIMARÃES, 1997; MALLELA *et al.*, 2004; CELAYA *et al.*, 2011).

Finalmente, a reação de carbonatação é descrita por Mallela *et al.* (2004) como um processo prejudicial à estabilização que pode ocorrer a partir do processo de misturação, neste caso, a cal reage com o dióxido de carbono, presente no ar, formando um carbonato

relativamente insolúvel, que pode ser danoso às reações pozolânicas com o solo.

Dosagem da cal no solo

A dosagem da cal no solo é a determinação de uma quantidade ideal do aditivo que irá alterar as propriedades da mistura, resultando em acréscimos na resistência mecânica e até em melhorias na durabilidade. O desenvolvimento de técnicas para a determinação da quantidade ideal de cal conduziu a criação de diversos métodos de dosagem, que têm como principal objetivo indicar o teor ótimo de cal.

Segundo Little (1995), essa variedade de métodos de dosagem reflete uma necessidade de adequação das propriedades buscadas na mistura solo-cal às especificidades de projeto de regiões diferentes. Assim, quando se utiliza um método de dosagem desenvolvido em uma região de características muito diferentes da região de aplicação, pode-se incorrer em discrepâncias graves.

O método do pH, descrito e utilizado neste estudo, normatizado pela ASTM D 6276 é baseado no método de Eades e Grim. Nele se objetiva encontrar a quantidade de cal que seja suficiente para que o solo satisfaça a capacidade de troca catiônica e outras reações iniciais na mistura solo-cal, assim como manter o pH alcalino e concentração livre de Ca^{++} para as reações pozolânicas (TRB, 1987; LITTLE, 1995).

De acordo com TRB (1987), o método do pH apresenta algumas limitações, pois com ele não é possível determinar se o solo reagirá com a cal para produzir um aumento substancial de resistência, tampouco recomenda monitoramento de dados de resistência para avaliar a qualidade da mistura.

Comportamento dos solos estabilizados com cal

Quando adicionada ao solo, a cal inicia algumas reações imediatas e outras que se desenvolvem em longo prazo, o que implica que a mistura apresente modificações nas suas características físicas e propriedades mecânicas.

A plasticidade é uma das características do solo que sofre alteração em curto prazo, apresentando uma redução do valor do índice de plasticidade e, como consequência tem-se uma melhora da trabalhabilidade do solo. Além disso, o aumento da umidade ótima e a redução da massa específica seca máxima do solo-cal são mudanças típicas desse processo de estabilização, confirmadas em inúmeros trabalhos, como os de Maior *et al.* (1983), Bueno (1996), Eren e Filiz (2009), Behak (2011) e Talluri *et al.* (2013).

A alteração dessas duas propriedades é resultado da floculação do solo quando a cal é adicionada, portanto, a quantidade e a dimensão dos vazios aumentam, reduzindo o $\rho_{dmáx}$. Complementarmente, se o número e o tamanho dos vazios são maiores, a quantidade de água a preenchê-los deverá ser maior, explicando-se o aumento do w_o (Sivapullaiah *et*

al., 1998² apud Lovato, 2004).

Para Thompson (1975), a adição de cal ao solo aumenta a sua resistência em longo prazo, devido principalmente às reações pozolânicas. No entanto, esse ganho de resistência pode sofrer influência de algumas variáveis, como:

- a. o tipo de solo,
- b. a porcentagem de cal, e,
- c. o tempo e as condições de cura do ambiente.

Por se tratar de um procedimento químico, a estabilização solo-cal depende de algumas particularidades da constituição do solo a ser estabilizado. Sabe-se que, entretanto, existem algumas diferenças entre os solos das regiões temperadas e os solos das regiões tropicais, devido principalmente ao processo de formação.

Os solos altamente intemperizados e bem drenados, como é o caso dos solos lateríticos, sofrem o processo de lixiviação de seus cátions metálicos, que serão substituídos por íons H⁺. Este processo resulta em um decréscimo do pH e da relação Ca/Mg. Outra característica dos solos bem intemperizados é a presença de ferro livre distribuído de maneira uniforme na fração argilosa do perfil bem drenado. Ele atua formando uma espécie de camada, retardando a reação pozolânica da cal com a sílica/alumina do solo (THOMPSON, 1966; LITTLE, 1995).

As análises de Thompson (1966) mostraram que valores altos de pH do solo natural e da relação Ca/Mg indicam maior reatividade do solo à cal. Nesse sentido, espera-se que solos não lateríticos apresentem maior reatividade que os solos lateríticos.

Em seus estudos de estabilização de solos com cal, Ingles e Metcalf (1972) e Petry e Wohlgemuth (1988) concluíram que o aumento do teor de cal nem sempre resulta em ganho de resistência, e sinalizaram que pode haver um teor ótimo para a estabilização dos solos, que, quando ultrapassado propicia redução da taxa de ganho ou redução da propriedade.

Alguns autores extraíram importantes conclusões sobre a influência do teor de cal na resistência da mistura. Lovato (2004), trabalhando com um solo argiloso da classe A-6 (AASHTO), mostrou que a resistência à compressão simples (RCS) e a resistência à tração por compressão diametral (RT) aumentaram linearmente com o aumento do teor de cal (3, 4 e 5% de cal).

Kolay *et al.* (2011) estabilizaram um solo altamente orgânico com 2, 4, 6 e 8% de cal. Os resultados desta pesquisa mostraram que a RCS aumentou até o teor de 6% de cal, seguida de uma queda da propriedade em 8% de cal.

2. SIVAPULLAIAH, P. V.; PRASHANTH, J. P.; SRIDHARAN, A. Delay in Compaction and Importance of the Lime Fixation Point on the Strength and Compaction Characteristics of Soil. **Ground Improvement**. N 32, pp 27-32, 1998.

Klinsky *et al.* (2014) pesquisaram recentemente a estabilização de dois solos (A-7-5 e A-6) com diferentes teores de cal (3, 5 e 7%) e encontraram que, de modo geral, as resistências (RCS e RT) aumentaram com a adição de cal quando comparadas as do solo original e que o incremento de resistência é particular ao tipo de solo e ao teor de cal adicionada. Os resultados desses pesquisadores evidenciam que misturas com ambos os solos apresentaram incrementos de RT, no entanto, a cal parece ter apresentado um efeito mais intenso no solo A-7-5. Com relação à RCS (Figura 2.4), os resultados das misturas com solo A-6 exibiram crescimento da propriedade em função do aumento do teor de cal, enquanto as misturas com solo A-7-5 mostraram ganho de resistência para o teor de 3% cal, seguida da estabilização de RCS para os teores de 5 e 7% de cal.

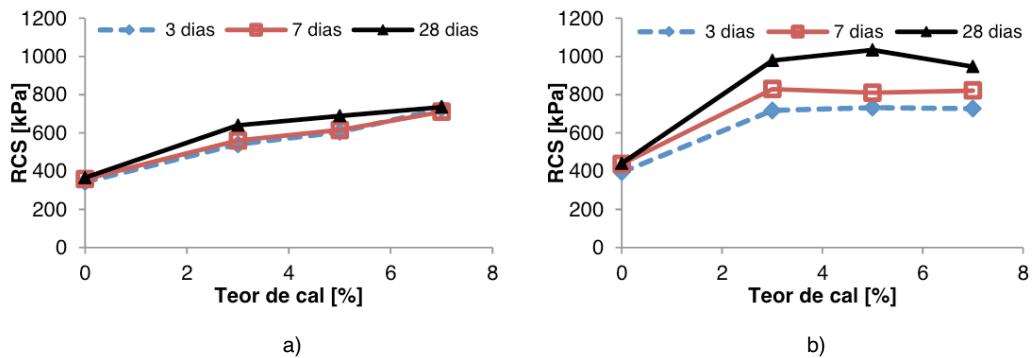


Figura 2.4. Solo A-6 (a) e solo A-7-5 (b) (KLINSKY *et al.*, 2014)

Ainda que a dosagem, a boa homogeneização e o controle de compactação em campo de misturas solo-cal sejam adequadamente realizados, seu desempenho depende das condições de cura e do ambiente. Fatores como tempo de cura, temperatura, umidade higroscópica e outras condições do ambiente podem influenciar positiva ou negativamente em algumas características da mistura solo-cal.

Para Thompson (1975), o mecanismo de ação da cal mais afetado pelas condições de cura e do ambiente são as reações pozolânicas, pois dependem do período de tempo, que, em alguns casos podem ocorrer durante anos; e das características ambientais, uma vez que temperaturas mais altas podem acelerar essas reações. Ainda no que se refere ao ambiente, o pH da mistura e a presença de certos minerais também são preponderantes para as reações pozolânicas, pois elas ocorrem quando a mistura apresenta pH alcalino e há disponibilidade de cátions Ca^{++} , sílica ou alumina do solo.

O efeito do tempo de cura na resistência dos solos estabilizados com cal já havia sido demonstrado por Thompson (1967) quando, estudando alguns solos de Illinois, observou

ganho de resistência das misturas de 28 para 56 dias. Prusinski e Bhattacharja (1999), pesquisando um solo tratado com 3% de cal e outro com 5% de cal, também observaram acréscimos nas RCS ao longo do período de cura (7, 28 e 90 dias).

Lovato (2004) monitorou a RCS de um solo A-6 estabilizado com cal aos 140 dias de cura e observou uma desaceleração do incremento de resistência no final do período (~112 dias). Em contrapartida, os resultados de RT não exibiram o mesmo comportamento, pois o aumento de resistência cessou aos 28 dias. Este fato, segundo o autor, indicaria uma carbonatação da cal utilizada, já que para as mesmas condições a RCS aumentou até os 140 dias. Vale ressaltar que a reação de carbonatação da cal processa-se de forma lenta, quando o aditivo entra em contato com o ar. Logo, a maior possibilidade de ocorrência deste tipo de problema encontra-se na utilização de cais expostas ao ar por muito tempo.

De forma geral, diferentemente das misturas solo-cimento, cujo ganho de resistência se estabiliza com a hidratação do cimento, nas misturas solo-cal ganhos de resistência podem continuar ocorrendo durante um período prolongado, desde que as condições de cura sejam adequadas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos utilizados no estudo da estabilização de solos com cal para aplicação em rodovias.

SOLOS

Foram utilizados dois solos, selecionados a partir do banco de dados de Takeda (2006). A escolha destes materiais levou em consideração o comportamento dos dois solos, ou seja, um solo apresentando comportamento laterítico e o outro não laterítico, embora essa verificação só pôde ser feita a partir de ensaios de caracterização, apresentados nos itens subsequentes.

Coleta e preparação

Os solos foram coletados em um talude no km 6 da rodovia SP-225, na cidade de Dois Córregos. Uma linha de seixos marcava a divisão entre solo laterítico (acima) e solo não laterítico (abaixo). Após a coleta, os materiais foram destoroados, passados na peneira nº 4 (4,8 mm), colocados ao sol para secagem, quarteados e homogeneizados. Os solos foram embalados e estocados em local coberto.



a)



b)

Figura 3.1. Preparação do solo: destorramento (a) e secagem dos solos (b)

Caracterização dos solos

Os ensaios para a caracterização dos solos foram realizados de acordo com as normas apresentadas na Tabela 3.1.

| Ensaios | Norma |
|---------------------------------|-----------------|
| Análise granulométrica conjunta | ABNT NBR 7181 |
| Limite de liquidez | ABNT NBR 6459 |
| Limite de plasticidade | ABNT NBR 7180 |
| Massa específica dos sólidos | ABNT NBR 6508 |
| Compactação Proctor | DER/SP M 13-71 |
| Metodologia MCT | DER/SP M 196-89 |

Tabela 3.1. Normas utilizadas nos ensaios de caracterização

As Figuras 3.2 e 3.3 exibem a distribuição granulométrica dos solos laterítico e não laterítico, respectivamente. Pode-se observar que os dois solos estudados possuem uma granulometria com predominância de partículas finas, tendo mais de 50% de silte e argila em sua composição.

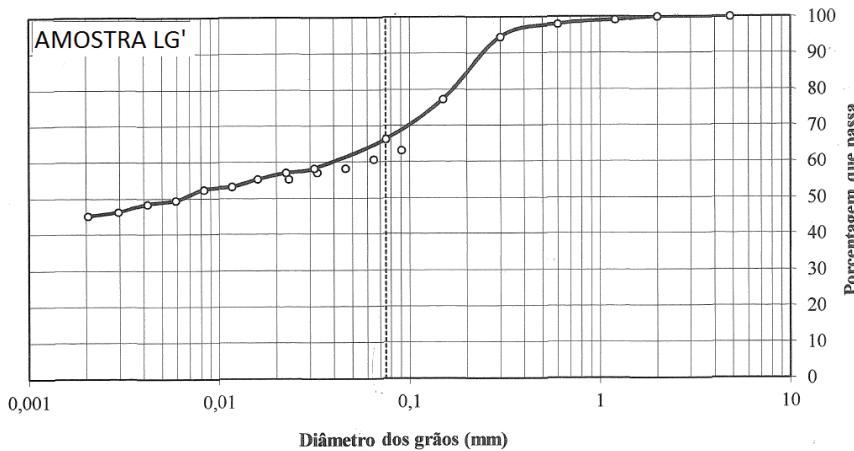


Figura 3.2. Distribuição granulométrica do solo laterítico

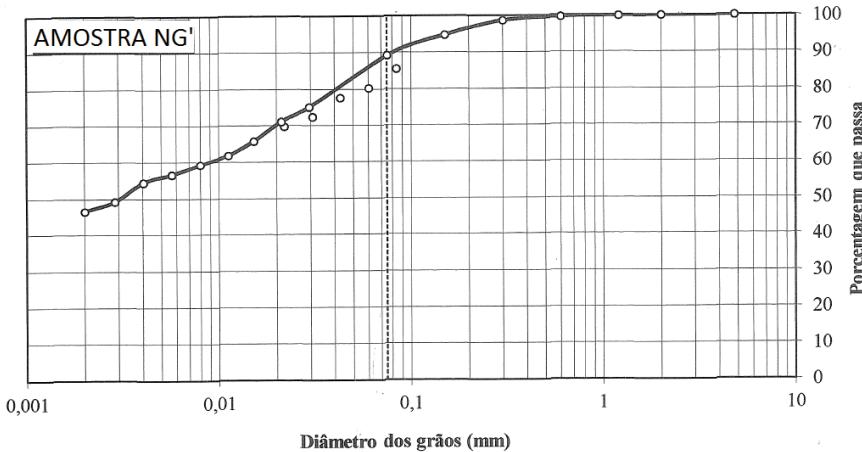


Figura 3.3. Distribuição granulométrica do solo não laterítico

A Tabela 3.2 mostra a quantidade das partículas constituintes dos solos, bem como os valores obtidos nos ensaios de determinação da massa específica dos sólidos (ρ_s) e dos limites de consistência (LL e LP).

| Caracterização | | | | | | | | |
|----------------|-------------------------------|--------------|-----------|-----------|------------|--------|--------|--------|
| Solo | ρ_s [g/cm ³] | % passa #200 | Areia [%] | Silte [%] | Argila [%] | LL [%] | LP [%] | IP [%] |
| LG' | 2,998 | 66 | 38 | 15 | 47 | 49 | 32 | 17 |
| NG' | 3,111 | 89 | 14 | 38 | 48 | 76 | 56 | 21 |

Tabela 3.2. Caracterização dos solos

No ensaio de compactação Proctor, foi utilizada a energia Normal. As Figuras 3.4 e 3.5 apresentam as curvas de compactação para os solos laterítico e não laterítico, respectivamente. Observa-se, pelas curvas, que o solo laterítico possui $\rho_{dmáx}$ igual a 1,662 g/cm³ e w_{ot} igual a 21,1%; enquanto o solo não laterítico possui $\rho_{dmáx}$ igual a 1,333 g/cm³ e w_{ot} igual a 36,0%.

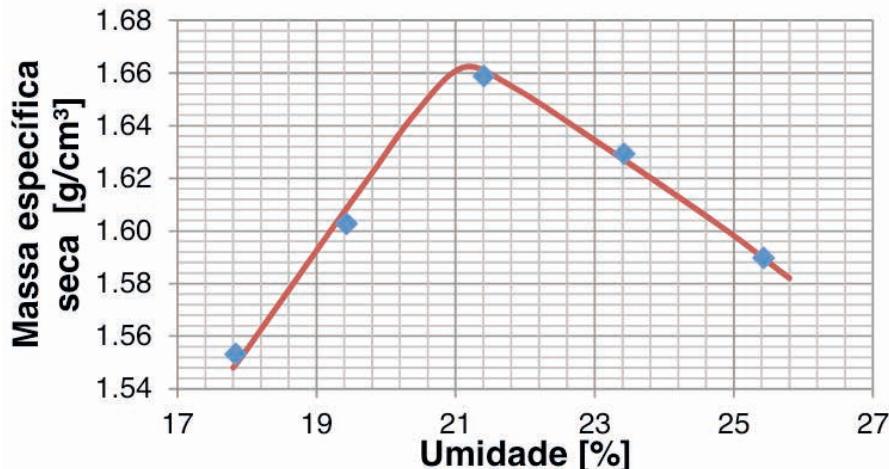


Figura 3.4. Curva de compactação do solo laterítico

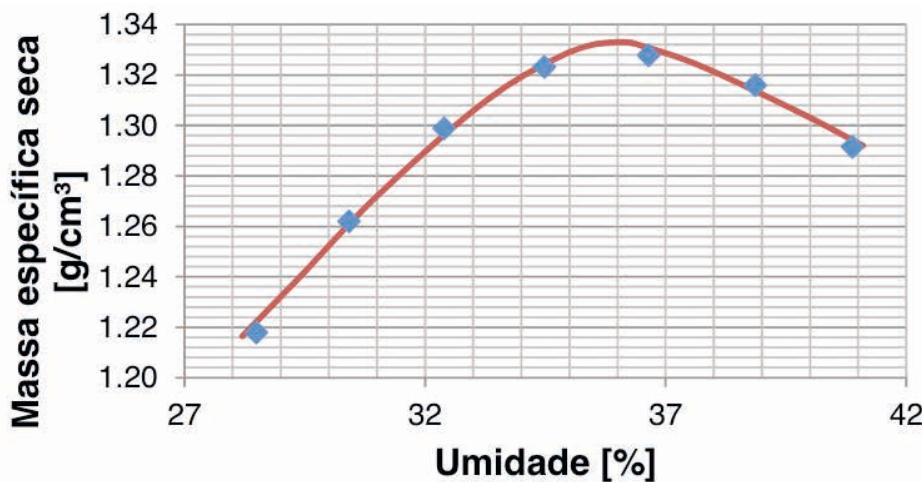


Figura 3.5. Curva de compactação do solo não laterítico

Utilizando as metodologias HRB e USCS, os solos foram classificados como pertencentes à classe dos solos argilosos (HRB) e, na metodologia USCS, como silte e silte elástico. A Tabela 3.3 apresenta estes resultados.

| Solo | Classificação | | |
|------|---------------|------|----------------|
| | HRB | USCS | |
| LG' | A-7-5 | ML | Silte |
| NG' | A-7-5 | MH | Silte Elástico |

Tabela 3.3. Classificação dos solos (HRB e USCS)

A classificação da metodologia MCT confirmou a hipótese de que o solo acima da linha de seixos exibia um comportamento laterítico e o solo situado abaixo, um comportamento não laterítico. A Tabela 3.4 apresenta os resultados da classificação MCT, incluindo a perda de massa por imersão (P_i) e os índices c' e e' .

| Solo | P_i [%] | c' | e' | Classificação |
|----------------|-----------|------|------|---------------|
| Laterítico | 0 | 2,03 | 0,70 | LG' |
| Não Laterítico | 63,3 | 2,23 | 1,16 | NG' |

Tabela 3.4. Classificação MCT

CAL

A cal utilizada na pesquisa foi a Cal Hidratada Itaú, do tipo CH-III. A escolha do tipo CH-III é justificada por seu uso frequente em obras rodoviárias, principalmente em estabilização de solos. A composição química da cal é apresentada na Tabela 3.5 a seguir. Pode-se notar que a faixa de concentração de hidróxido de cálcio possui uma variação de 13%. Este fato pode ser relacionado a diferenças entre as rochas utilizadas e variações nos procedimentos de fabricação.

| Nome Químico | Número CAS | Faixa de Concentração [%] |
|-----------------------|------------|---------------------------|
| Hidróxido de Cálcio | 1305-62-0 | 65-78 |
| Hidróxido de Magnésio | 1305-62-0 | 15-25 |
| Carbonato de Cálcio | 1317-65-3 | <15 |
| Óxido de Cálcio | 1305-78-8 | <15 |

Tabela 3.5. Composição química da cal (Fonte: Votorantim Cimentos)

DOSAGEM

A quantidade de cal a ser adicionada ao solo foi obtida através da norma ASTM D6276 *Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization*. Essa norma é baseada no método do pH de Eades e Grim e tem como objetivo definir o teor ótimo de cal que misturada ao solo resulte no pH de 12,4.

O procedimento consiste em separar uma quantidade de solo natural equivalente a 25 g de solo seco em estufa e adicionar, para cada amostra, teores de cal crescentes (2, 3, 4, 5 e 6%). As misturas foram colocadas em recipientes plásticos tampados.

Em seguida, adiciona-se 100 ml de água em cada recipiente e agita-se a mistura por 30 s em intervalos de 10 min até completar 1h. Completado o processo, espera-se 15 min

até que o pH da mistura possa ser determinado com o auxílio de um pHmetro.

O teor ótimo de cal é a mínima porcentagem adicionada ao solo que resulte em um pH de 12,4. Se a mistura solo-cal não estabilizar o pH neste valor, o teor ótimo de cal será a porcentagem correspondente ao ponto a partir do qual o pH se estabiliza.

Após a determinação do teor ótimo de cal, foram executados ensaios de compactação Proctor na energia Normal para determinar a w_o e $\rho_{dmáx}$ das misturas solo-cal.

COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

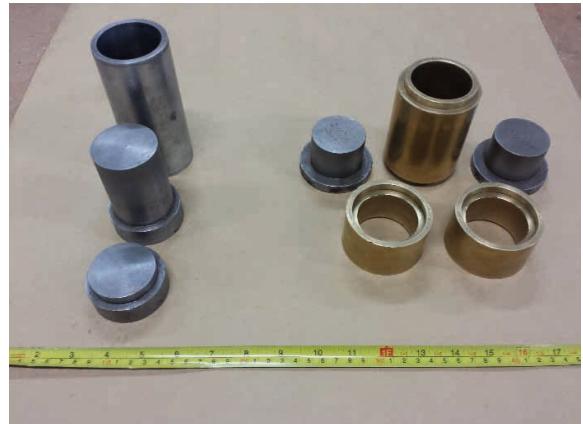
As misturas solo-cal foram realizadas com o solo na umidade higroscópica, a este solo foram adicionados uma quantidade de cal relativa à porcentagem ótima (obtida pelo método do pH) e água suficiente para atingir w_o . Os componentes foram devidamente misturados e homogeneizados; em seguida, foram compactados. A compactação dos corpos de prova foi realizada estaticamente, com o auxílio de uma prensa hidráulica [Figura 3.6 (a)]. A Tabela 3.6 apresenta as dimensões e o número de camadas dos corpos de prova de acordo com o tipo de ensaio.

| Ensaio | Dimensões [cm x cm] | Número de camadas |
|--|---------------------|-------------------|
| Resistência à compressão simples (RCS) | 5 x 10 | 3 |
| Resistência à tração por compressão diametral (RT) | 5 x 5 | 1 |

Tabela 3.6. Moldagem dos corpos de prova



a)



b)

Figura 3.6. Equipamentos para confecção dos corpos de prova: prensa hidráulica (a) e moldes RCS e RT (b)

Os corpos de prova foram compactados para atingir w_o e $p_{dmáx}$. Para w_o foi adotada uma margem de $\pm 0,5\%$, e para o controle da $p_{dmáx}$ foi adotado um grau de compactação (GC) entre 99 e 101%. Depois de compactados, os corpos de prova foram embalados em filme plástico, colocados em sacos fechados hermeticamente, identificados e depositados em câmara úmida até que atingissem o período de cura determinado. Os períodos de cura escolhidos foram 0, 7, 28 e 60 dias para os ensaios de RCS e RT. A Tabela 3.7 apresenta a quantidade de corpos de prova compactados para um único solo, sendo que metade dos corpos de provas de RCS e RT foram ensaiados após imersão de 4 horas.

| Condição | Dias de cura | Ensaios | | | |
|----------|--------------|------------|--------|------------|--------|
| | | RCS | | RT | |
| | | Não imerso | Imerso | Não imerso | Imerso |
| Natural | 0 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | 0 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | 7 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | 28 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | 60 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | | | | | |

Tabela 3.7. Quantificação de corpos de prova para um solo

Portanto, foram compactados 60 corpos de prova por solo, totalizando 120 corpos de prova utilizados na pesquisa. A Figura 3.7 apresenta exemplos dos corpos de prova utilizados para os ensaios de RCS e RT.

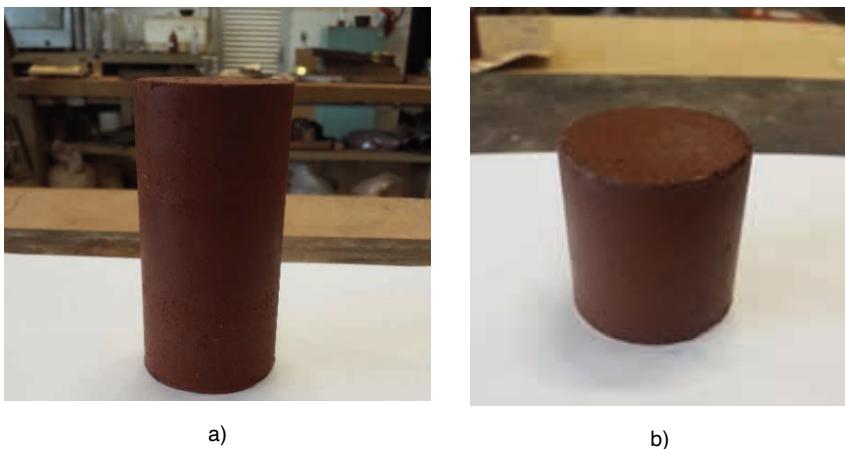


Figura 3.7. Exemplos de corpos de prova: RCS (a) e RT (b)

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os ensaios de resistência à compressão simples (RCS) foram executados na prensa com anel dinamométrico, capaz de aplicar uma carga de 50 kN. O modo escolhido para ensaio foi o de deformação controlada a uma velocidade de 1,27 mm/min. Para o controle do ensaio, dois extensômetros foram utilizados, um posicionado no prato da prensa e outro no anel dinamométrico. A cada 0,05 mm de deslocamento do prato, era feita uma leitura no extensômetro do anel. Prosseguia-se com as leituras até que o corpo de prova atingisse sua resistência máxima. A Figura 3.8 apresenta um corpo de prova durante e após o ensaio de RCS.



a)



b)

Figura 3.8. Ensaio de RCS: prensa de ensaio (a) e detalhe do corpo de prova após a ruptura (b)

A RCS foi calculada a partir da equação (3.1) apresentada a seguir:

$$R_{CS} = \frac{4 \cdot F}{g \cdot \pi \cdot D^2} \quad (3.1)$$

Em que,

R_{CS} – Resistência à compressão simples [MPa];

F – Força máxima de compressão [N];

g – Aceleração da gravidade, adotada como $9,81 \text{ m/s}^2$;

D – Diâmetro do corpo de prova [cm].

O ensaio de RCS tem como resultado, além da resistência última de compressão, uma curva do tipo tensão *versus* deformação, que pode ser utilizada para determinação do módulo tangente da amostra. Partindo do ponto referente à 50% do valor da tensão de ruptura, é possível traçar uma reta tangente à curva de tensão *versus* deformação que passe por este ponto. A inclinação desta reta representa uma medida da deformabilidade da amostra, chamada módulo tangente a 50% da tensão de ruptura. A Figura 3.9 esquematiza a determinação do $E_{T,50\%}$.

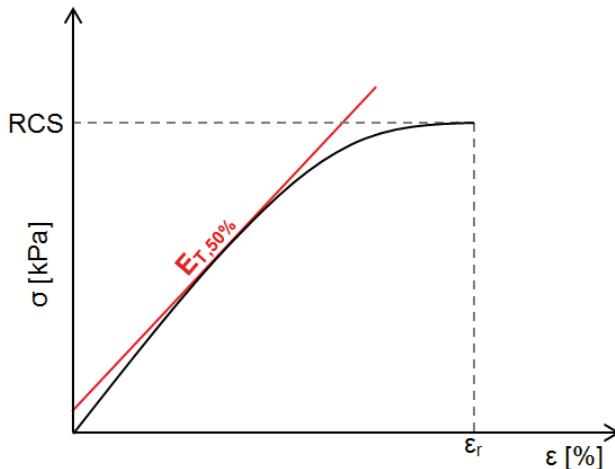


Figura 3.9. Determinação do módulo tangente a 50% de RCS

Essa determinação foi realizada para todos os corpos de prova submetidos ao ensaio de RCS, seja na condição imersa ou não imersa. Ainda que o método possua uma natureza simplificada, é uma boa ferramenta para análises gerais.

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT) foram executados na mesma prensa empregada para o ensaio de RCS, mas foi utilizado um aparato para a disposição do corpo de prova na diametral, como se observa na Figura 3.9. O cálculo da RT foi realizado a partir da equação (3.2).

$$R_T = \frac{2 \cdot F}{100 \cdot \pi \cdot D \cdot h} \quad (3.2)$$

Onde,

R_T – Resistência à tração por compressão diametral [MPa];

F – Força máxima [N];

D – Diâmetro do corpo de prova [cm];

h – Altura do corpo de prova [cm].



Figura 3.10. Ensaio RT

IMERSÃO DOS CORPOS DE PROVA DE RCS E RT

Com o objetivo de verificar o efeito deletério da água nos corpos de prova submetidos aos ensaios de RCS e RT, realizou-se a imersão durante um período de 4 horas antes da realização dos ensaios. Esse período de imersão prévia foi adotado em conformidade com outras pesquisas realizadas no Departamento de Transportes da EESC/USP como os trabalhos de Silvestre Júnior (2002), Oliveira (2005) e Silva Júnior (2010). A Figura 3.11 apresenta corpos de prova durante a imersão.

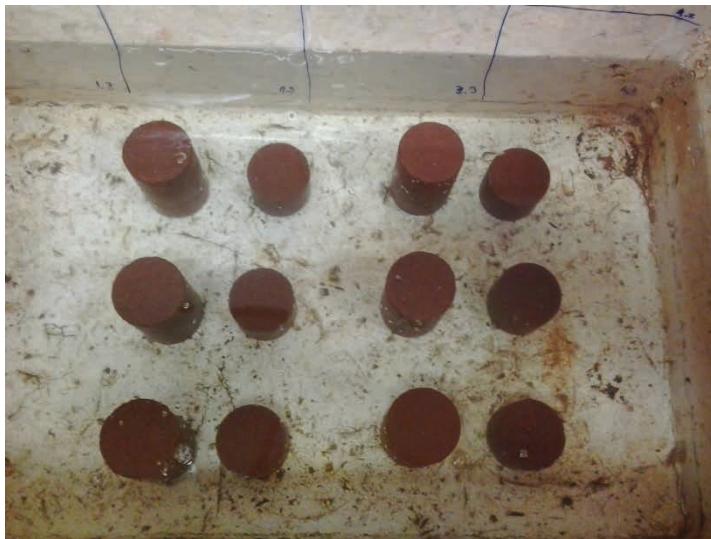


Figura 3.11 Corpos de prova imersos

ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA RCS E RT

Para analisar os resultados relacionados aos ensaios de RCS e RT foi aplicado o teste de Grubbs (1969) para identificar *outliers*. O teste consiste na aplicação da média aritmética e do desvio padrão dos resultados no cálculo de um valor estatístico (G), usado para detectar os *outliers*. A equação para o cálculo do G é apresentada a seguir.

$$G = \max \left(\frac{Y_i - \bar{Y}}{s} \right) \quad (3.3)$$

Em que:

Y_i – valores máximo e mínimo dentro do mesmo conjunto de resultados;

\bar{Y} - média dos resultados de um mesmo tratamento;

s – desvio padrão dos resultados de um mesmo tratamento.

Para que o resultado possa ser considerado um *outlier*, o valor estatístico G deve ser superior ao valor $G_{\text{crítico}}$, que depende do número de repetições (N) e do grau de confiança (α). O nível de confiança para este trabalho foi de 95%, com três observações feitas para cada ensaio. O $G_{\text{crítico}}$ utilizado foi de 1,15.

Quando um *outlier* é identificado, elimina-se a observação relacionada e efetuam-se novos cálculos de média, desvio padrão e valor estatístico, aplicando novamente o teste. Todos os resultados relativos aos ensaios de RCS e RT apresentados nesta pesquisa são

os resultados já submetidos ao teste de Grubbs. A aplicação do teste a esses resultados, bem como as observações eliminadas podem ser encontradas nos apêndices do texto.

ENSAIOS PRELIMINARES

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados de ensaios para caracterização das misturas (dosagem e compactação Proctor) e resultados relevantes sobre a variação dos parâmetros de compactação para corpos de prova que foram descartados devido a problemas de controle de qualidade e de infiltração de água no período de cura.

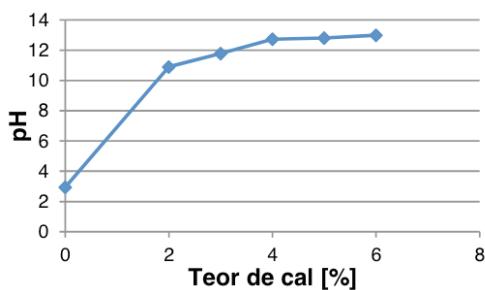
CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS

Nesta etapa, apresentam-se os resultados de dosagem de cal dos dois solos, realizada com o objetivo de indicar qual a porcentagem ótima de estabilizante. Para um melhor entendimento dos efeitos da adição de cal ao solo, esses resultados foram considerados como valores iniciais para a adoção de outras duas porcentagens de cal (1% acima e 1% abaixo do teor ótimo).

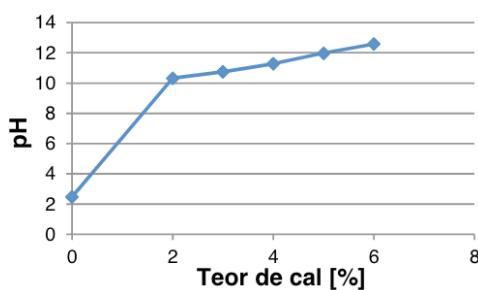
De posse dos teores de cal para cada solo, executaram-se os ensaios de compactação Proctor na energia Normal, para a aquisição dos parâmetros de compactação.

Dosagem da cal no solo

O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM D6276 e o pH foi medido para os teores de 0, 2, 3, 4, 5 e 6% de cal. As curvas pH x porcentagem de cal são apresentadas na Figura 4.1 e os resultados dos teores de cal são apresentados na Tabela 4.1.



a)



b)

Figura 4.1. Dosagem da cal no solo laterítico (a) e no solo não laterítico (b)

Pode-se observar que, para o solo LG', a porcentagem ótima de cal é 4% da massa seca, enquanto que para o solo NG' a porcentagem ótima é 6%. Por possuir um pH mais ácido (2,5), o solo NG' demanda uma quantidade maior de cal (2% em relação ao solo LG') para que, segundo Thompson (1966), a mistura possa desenvolver um ambiente propício

às reações pozolânicas (pH alcalino).

| Dosagem pH | | | |
|--------------|------|--------------|------|
| LG' | | NG' | |
| Amostra | pH | Amostra | pH |
| Solo Natural | 2,9 | Solo Natural | 2,5 |
| 2% de Cal | 10,9 | 2% de Cal | 10,3 |
| 3% de Cal | 11,8 | 3% de Cal | 10,8 |
| 4% de Cal | 12,7 | 4% de Cal | 11,3 |
| 5% de Cal | 12,8 | 5% de Cal | 12,0 |
| 6% de Cal | 13,0 | 6% de Cal | 12,6 |
| Cal + Água | 13,4 | Cal + Água | 14,0 |

Tabela 4.1. Dosagem de cal no solo

Considerando o processo de formação destes dois solos, pode-se verificar que o comportamento apresentado é diferente do esperado, uma vez que solos lateríticos tendem a ser mais ácidos devido ao processo de lixiviação. Contudo, no que tange aos teores prováveis necessários para a estabilização, os resultados podem ser considerados razoáveis, já que o solo laterítico, por exemplo, necessitou de menor quantidade de cal para atingir o pH de 12,4, se comparado ao solo não laterítico. Isto se deve ao tipo e à quantidade de argila que compõem o solo, em outras palavras, entende-se que solos compostos por altas porcentagens de argilas de alta plasticidade, como é o caso dos solos não lateríticos, demandam maior quantidade de cal para sua estabilização.

Vale ressaltar, por fim, que para os ensaios deste capítulo, adotaram-se três valores de porcentagem de cal para cada solo estudado. Tais valores variaram em $\pm 1\%$ em torno do teor ótimo. Portanto, para o solo LG', adotaram-se as porcentagens 3, 4 e 5% de cal. Para o solo NG', as porcentagens de cal foram: 5, 6 e 7%. Para o capítulo seguinte, os ensaios mecânicos foram realizados apenas na condição de teor ótimo.

Ensaio de compactação Proctor

As misturas de solo-cal foram submetidas ao ensaio de compactação Proctor na energia Normal. As curvas de compactação das misturas solo-cal e dos solos sem adição de cal encontram-se na Figura 4.2. A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros de compactação (w_o e $\rho_{dmáx}$).

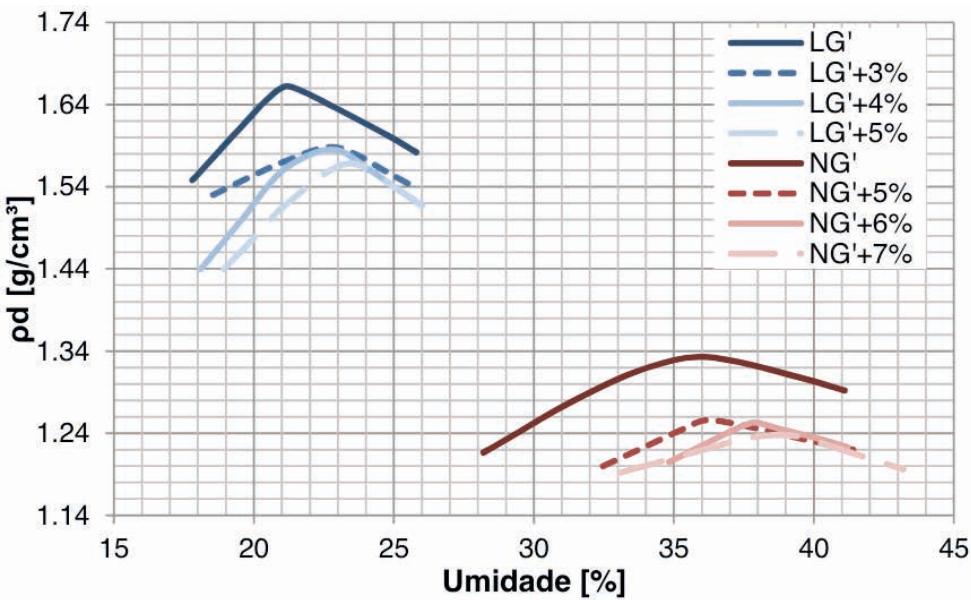


Figura 4.2. Compactação Proctor das misturas solo-cal

| Laterítico | | | Não Laterítico | | |
|------------|-----------|-------------------|----------------|-----------|-------------------|
| Mistura | wo [%] | pdmáx [g/ cm³] | Mistura | wo [%] | pdmáx [g/ cm³] |
| Natural | 21,10 | 1,662 | Natural | 36,00 | 1,333 |
| 3% de cal | 22,60 | 1,588 | 5% de cal | 36,25 | 1,256 |
| 4% de cal | 22,80 | 1,585 | 6% de cal | 37,82 | 1,253 |
| 5% de cal | 23,30 | 1,568 | 7% de cal | 38,68 | 1,238 |

Tabela 4.2. Parâmetros de compactação das misturas solo-cal

Analizando os resultados apresentados, pode-se confirmar a tendência da redução do $\rho_{dmáx}$ e do acréscimo de w_o quando a cal é misturada ao solo. Tomando-se o solo natural como referência, as misturas de solo LG' com cal levaram a acréscimos de até 10% na w_o e decréscimos de até 6% na $\rho_{dmáx}$, enquanto as misturas de solo NG' com cal apresentaram acréscimos de até 7% na w_o e decréscimos de até 7% na $\rho_{dmáx}$. Assim sendo, atribuem-se essas primeiras variações de comportamentos às reações de troca catiônica e de floculação.

Constata-se também a influência da granulometria dos solos na curva de compactação, pois o solo que tem uma porcentagem superior de fração areia (LG') encontra-se mais à esquerda e acima do solo residual (NG').

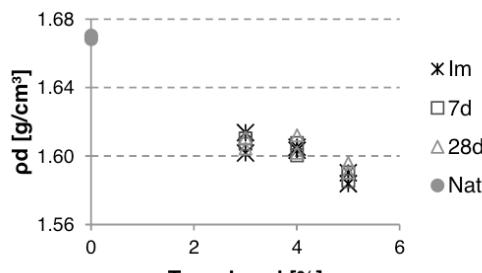
PROPRIEDADES FÍSICAS

Para a pesquisa, muitos corpos de prova foram compactados para os ensaios de RCS e RT. No entanto, devido a dificuldades no controle da umidade de compactação, alguns corpos de prova foram descartados por não atenderem ao critério de umidade ($w_o \pm 0,5\%$). Ainda que não apresentassem uma margem segura para serem considerados nos ensaios para determinação das propriedades mecânicas, esses corpos de prova mostraram resultados relevantes quanto aos efeitos da cal na variação dos parâmetros de compactação.

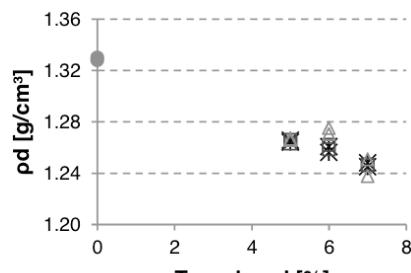
A determinação dos parâmetros de compactação foi executada para o solo com e sem adição de cal, na condição não imersa, para períodos de cura variados.

A Figura 4.3 apresenta a variação da massa específica seca (ρ_d) em função do aumento do teor de cal. É possível notar uma tendência de decréscimo no ρ_d quando se aumenta o teor de cal. Esse fenômeno é uma das características típicas da estabilização solo-cal, a partir do qual se pode inferir a ocorrência de reações de floculação.

Na Figura 4.4, observa-se que a umidade da mistura tende a ser superior à do solo natural, crescendo com o aumento do teor de cal. Como já citado anteriormente, quando ocorrem reações de troca catiônica e floculação na mistura solo-cal, a estrutura resultante apresenta-se com um maior número e volume de vazios, implicando em uma maior retenção de água.

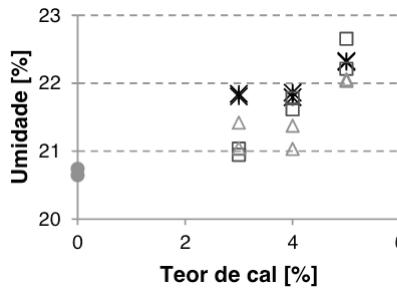


a)

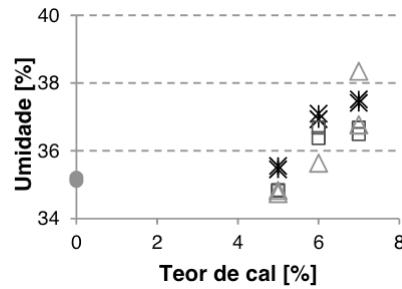


b)

Figura 4.3. Massa específica seca x teor de cal da mistura com solo laterítico (a) e não laterítico (b)



a)



b)

Figura 4.4. Umidade x teor de cal da mistura com solo laterítico (a) e não laterítico (b)

Por fim, pode-se dizer que as misturas de solo-cal apresentaram comportamentos que indicam a ocorrência de reações de curto prazo (trocas catiônicas e flocação/aglomeração).

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios mecânicos com o intuito de verificar o método de dosagem empregado e de realizar algumas considerações acerca das propriedades das misturas de solo-cal.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os ensaios de RCS foram realizados em tréplicas e os valores da propriedade são apresentados em valores médios. Para o tratamento estatístico dos resultados foi aplicado o teste de Grubbs (1969) para identificação de *outliers*, sendo que os resultados assim identificados foram excluídos da média para não prejudicar a representatividade do grupo. A análise estatística pode ser visualizada no Apêndice A.

A RCS é uma das principais propriedades avaliadas quando se estuda solos estabilizados. A Tabela 5.1 apresenta os resultados, em termos médios, dos ensaios de RCS sem imersão em diferentes tempos de cura.

| Cura [dias] | σmédio [kPa] | | | |
|-------------|--------------|-----|-----|-----|
| | 0 | 7 | 28 | 60 |
| LG' | 314 | | | |
| LG' + 4% | 179 | 212 | 260 | 273 |
| NG' | 293 | | | |
| NG' + 6% | 185 | 211 | 230 | 235 |

Tabela 5.1. Resistência à compressão simples

Nessa tabela, os valores de RCS apresentados para os solos naturais foram obtidos no dia 0, ou seja, resistência imediata, e estes valores foram considerados como valores de referência para todos os dias de cura. Esta hipótese da pesquisa foi adotada porque a RCS dos solos naturais não deveria mudar, uma vez que durante a cura os corpos de prova permaneceriam embalados em câmara úmida, podendo-se, desta forma, garantir a manutenção da umidade de compactação.

Em termos absolutos, observa-se que a diferença entre os valores de RCS dos solos naturais é pequena (solo LG' apresenta RCS 7% maior que a RCS do solo NG'). Com a adição de cal, as misturas com solos LG' e NG' apresentaram valores semelhantes para os primeiros períodos de cura (imediato e 7 dias), porém, para os períodos de cura mais longos (28 e 60 dias), a mistura com solo LG' exibiu maiores valores de RCS que a mistura com solo NG'. Os valores exibidos na tabela também indicam que, apesar de as

duas misturas apresentarem aumento dos valores de RCS ao longo do período de cura, nenhuma delas conseguiu superar os valores de RCS dos solos sem adição de cal.

Para melhor visualização do comportamento das misturas solo-cal, os resultados de RCS *versus* período de cura dos solos LG' e NG' são apresentados nas Figuras 5.1 e 5.2, respectivamente.

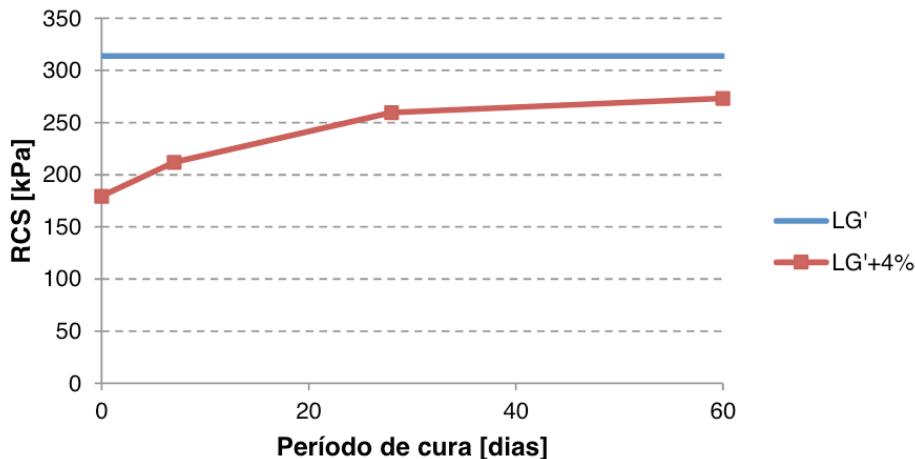


Figura 5.1. RCS das misturas de solo laterítico e cal

Da Figura 5.1 pode-se notar que embora a mistura de solo LG' com cal não apresente resultados de RCS superiores ao do solo natural, ela exibe um aumento da propriedade com o tempo (período de cura). Esse aumento pode ser avaliado a partir da análise da taxa de crescimento da RCS em três intervalos: até 7 dias, de 7 a 28 dias e de 28 a 60 dias de cura. Desta forma, para a mistura solo LG' com cal pode-se dizer que:

- No período de 0 a 7 dias de cura, observa-se que a mistura apresenta os menores valores de RCS, contudo, apresenta uma importante taxa de acréscimo de resistência (em torno de 15%);
- No período de 7 a 28 dias de cura, é possível notar que a mistura continua a ganhar resistência e apresenta a maior taxa de acréscimo de RCS (em torno de 18%);
- No período de 28 a 60 dias de cura, nota-se a estabilização do incremento de RCS, uma vez que a taxa reduz-se a 5%. Essa tendência à estabilização pode ser um indício de que as reações pozolânicas estão cessando.

É importante verificar também que, ao final do período de 60 dias de cura, a mistura com solo LG' apresenta um valor de RCS 13% menor que o RCS do solo natural.

A Figura 5.2 apresenta os resultados de RCS em função do período de cura das

misturas do solo NG' com cal, nela pode-se observar que os valores de RCS da mistura solo-cal exibem aumento ao longo do tempo, no entanto, foram sempre inferiores a RCS do solo natural.

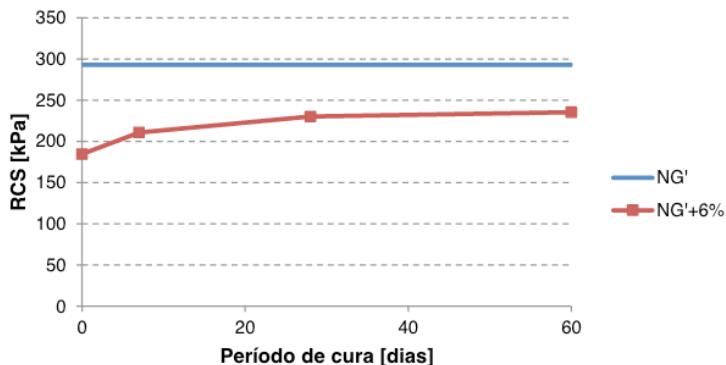


Figura 5.2. RCS das misturas de solo não laterítico e cal

Assim como para a mistura de solo LG' com cal, é possível também avaliar o acréscimo de RCS para a mistura de solo NG' com cal, considerando as três fases do período de cura, ou seja:

- No período de 0 a 7 dias de cura, a mistura de solo NG' com cal apresentou a maior taxa de acréscimo de RCS (aproximadamente 12%);
- No período de 7 a 28 dias de cura, a taxa de acréscimo de RCS reduz-se a 8%;
- O período de 28 a 60 dias de cura apresenta uma taxa de acréscimo de RCS de 2%, ou seja, houve uma estabilização da RCS, que pode ser devido ao fim das reações pozolânicas.

No fim do período de 60 dias de cura, a mistura de solo NG' com cal exibe uma RCS 20% menor que a RCS do solo natural.

As curvas de RCS indicam que o efeito da cal no solo NG' foi menos intenso se comparado com o efeito no solo LG'. Este comportamento pode estar teoricamente relacionado a) à aptidão do método de dosagem, que pode ter resultado num teor de cal insuficiente para a manutenção do pH alcalino e para a disponibilidade de Ca^{++} , dificultando a ocorrência das reações pozolânicas; b) à baixa relação de certos componentes minerais como Ca e Mg que são indicadores da reatividade dos solos com a cal; e/ou c) à carbonatação da cal utilizada.

Com o intuito de verificar o efeito deletério da água nas misturas de solo com cal, foram realizados ensaios de RCS em corpos de prova após imersão de 4 horas. Os

resultados destes ensaios são apresentados, em termos médios, na Tabela 5.2.

| Cura [dias] | σmédio [kPa] | | | |
|-------------|--------------|-----|-----|-----|
| | 0 | 7 | 28 | 60 |
| LG' | 0 | | | |
| LG' + 4% | 0 | 103 | 135 | 136 |
| NG' | 0 | | | |
| NG' + 6% | 0 | 97 | 122 | 125 |

Tabela 5.2. Resistência à compressão simples com imersão

Analizando a Tabela 5.2, pode-se notar que os solos naturais e as misturas de solos LG' e NG' com cal ensaiadas imediatamente apresentam valores nulos de RCS imerso, porque para essa condição, os corpos de prova desintegraram-se, impossibilitando a realização dos ensaios de RCS. A Figura 5.3 apresenta a situação ocorrida para esses corpos de prova.



Figura 5.3. Corpos de prova em desintegração

Para os períodos de cura de 7 a 60 dias, os corpos de prova de solos estabilizados conseguiram apresentar alguma manutenção de integridade para a realização dos ensaios de RCS, indicando que a cal pode ter favorecido a retenção da RCS para as misturas com os dois tipos de solo (LG' e NG').

A fim de visualizar de forma mais clara o comportamento das misturas submetidas à imersão, apresentam-se na Figura 5.4 gráficos de barras, comparando os valores de RCS das misturas de solos LG' e NG' com cal nas condições não imersa e imersa.

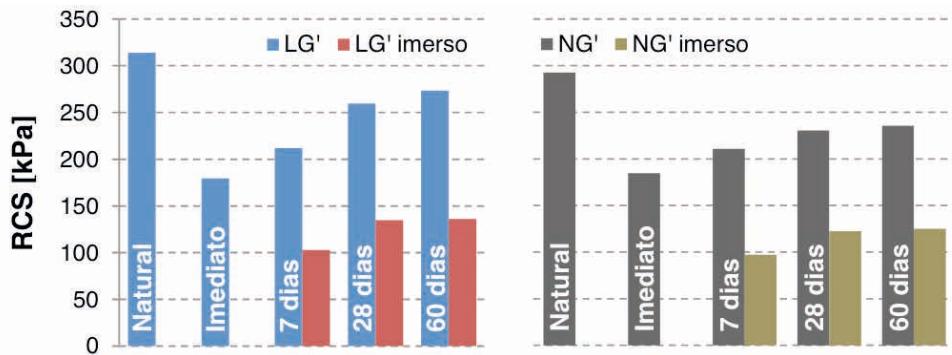


Figura 5.4. RCS não imerso e imerso

Pode-se verificar que a mistura com solo LG' apresenta maiores valores de RCS imerso que a mistura com solo NG'. Nos períodos de cura em que há a possibilidade de uma comparação entre os valores de RCS nas condições não imersa e imersa (7, 28 e 60 dias), nota-se uma redução de aproximadamente 50% do valor de RCS quando as misturas são ensaiadas depois da imersão, para as misturas com solo LG' e NG'.

Outro fato relevante está relacionado com a importância da estabilização dos solos com cal em manter a integridade da mistura frente aos efeitos deletérios da água. Verifica-se que, atingidos 7 dias de cura, embora as misturas apresentem uma considerável redução no valor de RCS, não ocorre a desintegração em contato com a água, o que é considerado uma vantagem, já que os solos compactados sem adição de cal não apresentam resistência quando imersos.

A capacidade de manter a integridade da mistura mesmo após imersão pode estar ligada a uma irreversibilidade das reações pozolânicas, pois nos períodos iniciais de cura em que essas reações não ocorrem, as misturas não apresentam resistência à ação da água. Nos solos naturais, onde não há reações cimentantes, pode-se dizer que suas resistências são compostas basicamente de parcelas coesivas e de succção. A coesão é afetada na presença excessiva de água, assim como a parcela de resistência ligada à succção matricial, onde as tensões capilares vão diminuindo conforme o teor de água aumenta. A presença da parcela de resistência ligada à succção matricial pode ser responsável pelos valores superiores de resistência dos solos naturais comparados aos solos estabilizados com cal. No entanto, para a comprovação desta suposição seriam necessários ensaios de succção para avaliar a intensidade desta componente da resistência.

Módulo tangente a 50% de RCS

Os resultados do módulo tangente a 50% da tensão de ruptura foram obtidos através da análise dos gráficos de tensão-deformação dos corpos de prova dos ensaios de RCS.

Portanto, para cada condição foram obtidos três valores de $E_{T,50\%}$. Os valores médios foram calculados e a identificação de *outliers* foi realizada com o teste de Grubbs. A análise estatística é apresentada no Apêndice B.

O módulo tangente a 50% da tensão de ruptura ($E_{T,50\%}$) é um parâmetro de simples obtenção e de utilização aceitável para a avaliação da rigidez dos materiais. Os resultados relativos ao $E_{T,50\%}$ das misturas com solo LG' e NG' nas condições não imersa e imersa são apresentados na Tabela 5.3.

| Condição | Dias de cura | ET,50%médio [MPa] | |
|----------|--------------|-------------------|--------|
| | | Não imerso | Imerso |
| LG' | 0 | 18 | 0 |
| | 0 | 13 | 0 |
| LG' + 4% | 7 | 17 | 16 |
| | 28 | 20 | 19 |
| | 60 | 20 | 19 |
| NG' | 0 | 13 | 0 |
| | 0 | 12 | 0 |
| NG' + 6% | 7 | 15 | 13 |
| | 28 | 17 | 16 |
| | 60 | 17 | 16 |

Tabela 5.3. Módulo tangente a 50% de RCS

Analizando a Tabela 5.3, pode-se notar que, em valores absolutos, a mistura de solo laterítico com cal apresentam os maiores valores de $E_{T,50\%}$. Também é possível notar, para as duas misturas, que os maiores valores de $E_{T,50\%}$ são encontrados nos períodos de 28 e 60 dias de cura. Essa constatação pode ser relacionada com o ganho de rigidez que as reações de cimentação (pozolânicas) proporciona ao solo estabilizado com cal.

A Figura 5.5 apresenta os resultados de $E_{T,50\%}$ nas condições não imersa e imersa dispostos em gráficos de barras, para uma melhor avaliação da variação do parâmetro das misturas ao longo do período de cura.

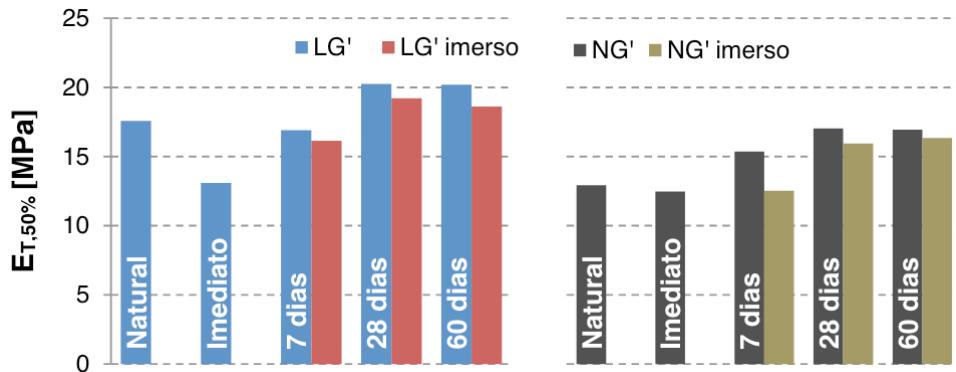


Figura 5.5. $E_{T,50\%}$ não imerso e imerso

Nota-se que, para a condição não imersa, no período de cura imediata, ambas as misturas apresentam rigidezes menores que as dos respectivos solos naturais. Para as misturas com solo LG', o valor de $E_{T,50\%}$ aumenta aos 7 dias de cura, mas ainda continua menor que o solo natural. Depois de 7 dias, a taxa de acréscimo leva a mistura a atingir valores de $E_{T,50\%}$ 15% superiores aos do solo original, indicando que a adição de cal ao solo leva a um acréscimo de rigidez.

Nas misturas com solo NG', valores de $E_{T,50\%}$ superiores ao solo natural já são evidenciados aos 7 dias de cura, aumentando até 28 dias e apresentando uma estabilização no período de 28 a 60 dias de cura. O $E_{T,50\%}$ estabiliza em um valor da ordem de 30% maior que o solo natural.

Quanto às análises relativas à influência da imersão dos corpos de prova, verifica-se que o solo natural e o solo-cal de cura imediata não apresentam valores de $E_{T,50\%}$, já que esses valores foram obtidos através do ensaio de RCS, que para essas misturas não puderam ser realizados na condição imersa. Nos períodos de cura em que a comparação é possível, pode-se notar que a influência da imersão não foi significativa, visto que a maior diferença de valores foi de 8% para a mistura com solo LG' e de 18% para a mistura com solo NG'.

Esse período em que a comparação dos valores não imersos e imersos pode ser realizada permite depreender que há alguma cimentação devido às reações pozolânicas. Portanto, pode ser o indício de que a rigidez em misturas de solo-cal está em sua maior parte relacionada às reações pozolânicas.

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Assim como realizado nos ensaio de RCS, os ensaios de RT foram realizados em

tréplicas, sendo os valores da propriedade apresentados em termos médios. As amostras passaram pelo teste estatístico de Grubbs (1969) para identificar *outliers* que a serem excluídos, com o intuito de melhorar a representatividade dos resultados. Essa análise estatística pode ser encontrada no Apêndice C deste trabalho.

Ainda que muitos estudos não contemplem a RT de misturas solo-cal, essa propriedade mostra-se importante para entender o desenvolvimento da resistência dessas misturas. O estudo dessa propriedade pode ser viável para avaliar a cimentação de misturas, uma vez que é comum a solicitação por tração em camadas cimentadas mais próximas da camada de revestimento. A Tabela 5.4 apresenta os resultados, em termos médios, dos ensaios de RT sem imersão em diferentes tempos de cura.

| Cura [dias] | σmédio [kPa] | | | |
|-------------|--------------|----|----|----|
| | 0 | 7 | 28 | 60 |
| LG' | 29 | | | |
| LG' + 4% | 12 | 18 | 28 | 28 |
| NG' | 29 | | | |
| NG' + 6% | 16 | 17 | 22 | 24 |

Tabela 5.4. Resistência à tração por compressão diametral

Da mesma forma que para a RCS, os valores de RT apresentados para os solos naturais foram obtidos no dia 0, ou seja, resistência imediata, e estes valores foram considerados como valores de referência para os dias de cura testados. Os resultados apresentados na Tabela 5.4 indicam que no período de cura imediata a mistura com solo NG' apresenta maior valor de RT que a mistura com solo LG', no entanto, a situação se inverte para os outros períodos de cura, evidenciando um comportamento semelhante ao ensaio de RCS. Vale ressaltar que, assim como para os ensaios de RCS, nenhuma das misturas dos solos com cal conseguiu superar o valor de RT dos solos naturais.

As Figuras 5.6 e 5.7 apresentam os resultados de RT nos 4 períodos de cura (0, 7 e 28 e 60 dias) para as duas misturas de cal com solo LG' e NG', respectivamente.

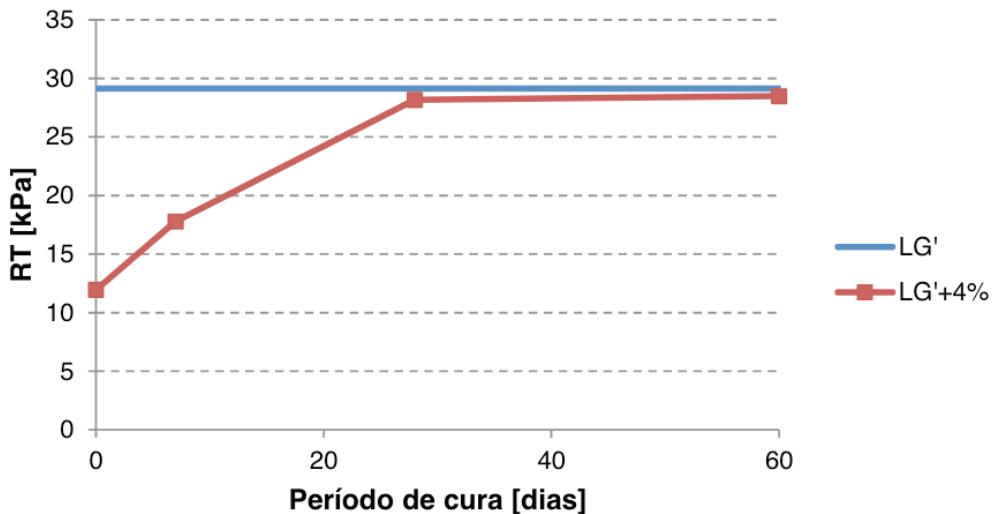


Figura 5.6. RT das misturas de solo laterítico e cal

A Figura 5.6 indica um crescimento acentuado da RT do solo-cal até os 28 dias de cura, estabilizando-se depois desse período. Quando os três intervalos são analisados separadamente, pode-se dizer que:

- No período de 0 a 7 dias de cura, a RT cresce a uma taxa de 33%, porém, em valor absoluto ao fim de 7 dias de cura permanece 38% abaixo do valor de RT do solo natural;
- No período de 7 a 28 dias de cura, a RT continua a crescer e uma maior taxa de acréscimo de RT (aproximadamente 36%) é encontrada;
- No período de cura de 28 a 60 dias, o acréscimo de RT estabiliza, indicando, assim como para o ensaio de RCS, o término das reações pozolânicas. Ao final de 60 dias, a mistura apresenta um valor de RT 3% inferior ao valor de RT do solo natural.

A Figura 5.7 mostra os resultados de RT para mistura com solo NG', que, de forma semelhante aos ensaios de RCS também apresenta todos resultados do solo-cal inferiores ao solo natural. Porém, o solo NG' com cal exibe acréscimos nos valores de RT conforme o período de cura aumenta. Analisando os três intervalos dos períodos de cura, tem-se que:

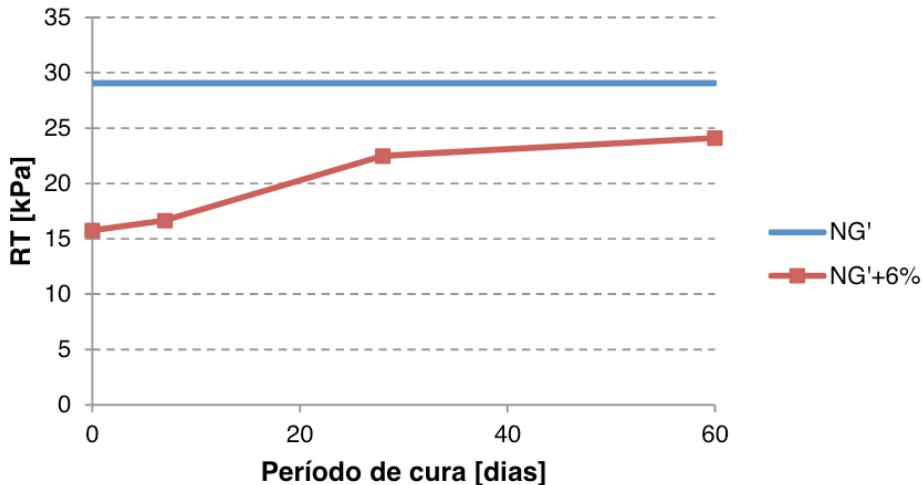


Figura 5.7. RT das misturas de solo não laterítico e cal

- No período de 0 a 7 dias de cura, a RT aumenta a uma baixa taxa de incremento de aproximadamente 6%
- No período de 7 a 28 dias de cura, a mistura ganha RT a uma taxa de acréscimo expressiva de cerca de 23%, no entanto, o valor de RT ao final de 28 dias é 24% menor que o valor de RT para o solo natural;
- No período de 28 a 60 dias de cura, a taxa de acréscimo de RT é de 8% esse valor indica uma desaceleração do ganho de RT e sugere o prosseguimento das reações pozolânicas.

Ao final do período de 60 dias de cura, observa-se um valor de RT da mistura com solo NG' 17% menor que o valor de RT para o solo natural.

Os resultados dos ensaios de RT indicam que o comportamento das misturas, de uma forma geral, é semelhante ao comportamento apresentado por elas nos ensaios de RCS. Novamente, o solo LG' misturado com cal apresentou efeitos mais intensos em função da adição de cal que as misturas do solo NG'. Por isso, podem ser aplicadas as mesmas considerações feitas com relação à RCS, ou seja: o problema pode estar relacionado à aptidão do método de dosagem, à baixa relação de certos componentes minerais no solo ou à carbonatação da cal utilizada.

O efeito deletério da água nas misturas de solo-cal também foi verificado nos ensaios de RT. A Tabela 5.5 apresenta os valores de RT, em termos médios.

| Cura [dias] | σmédio [kPa] | | | |
|-------------|--------------|---|----|----|
| | 0 | 7 | 28 | 60 |
| LG' | 0 | | | |
| LG' + 4% | 0 | 7 | 8 | 8 |
| NG' | 0 | | | |
| NG' + 6% | 0 | 5 | 6 | 7 |

Tabela 5.5. Resistência à tração com imersão

Para a melhor visualização da variação de RT durante o período de cura e nas condições não imersa e imersa, a Figura 5.8 apresenta os resultados em gráficos de barras. Semelhantemente aos ensaios de RCS com imersão, os únicos corpos de prova de RT que conseguiram manter a integridade foram os estabilizados e nos períodos de cura de 7, 28 e 60 dias. Analisando a Tabela 5.5, pode-se notar que para estes períodos de cura o ganho de resistência é crescente para a mistura com solo NG'. A mistura com solo LG' apresenta um crescimento da propriedade até 28 dias, seguido de uma estabilização após os 28 dias. Portanto, o comportamento é análogo ao mesmo período sem imersão.

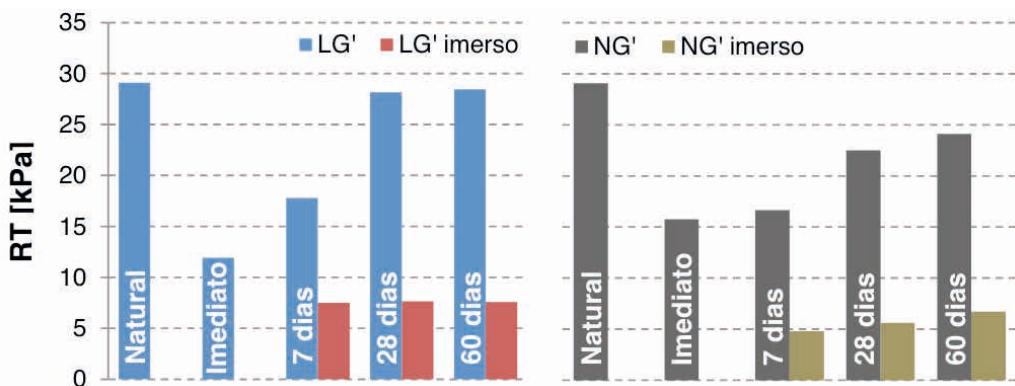


Figura 5.8. RT não imerso e imerso

A partir da análise da Figura 5.8, nota-se que as misturas com solo LG' apresentam maiores valores de RT imerso que as misturas com solo NG'. Nos períodos de cura em que há a possibilidade de uma comparação entre os valores de RT nas condições não imersa e imersa (7, 28 e 60 dias), pode-se verificar uma redução de aproximadamente 68% do valor de RT quando as misturas com solo LG' são ensaiadas depois da imersão. Para as misturas com solo NG', essa redução é de aproximadamente 72%.

Assim como verificado para os corpos de prova ensaiados para RCS com imersão, a vantagem da conservação da integridade dos corpos de prova de RT após períodos de cura

de 7 dias também é evidenciada nesta pesquisa. Desta forma, a capacidade de manter a integridade da mistura após imersão pode estar ligada a uma irreversibilidade das reações pozolânicas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adição de cal ao solo conduz as misturas a apresentarem comportamentos distintos dos observados para o solo natural. Os efeitos resultantes desta técnica de estabilização são listados a seguir:

- a. Os solos LG' e NG' estabilizados com cal apresentaram, para os ensaios de RCS e RT na condição não imersa, um acréscimo na propriedade até os 28 dias de cura, utilizando os valores de RCS e RT na condição de cura imediata como referência. Após os 28 dias, as misturas apresentaram uma tendência à estabilização das propriedades até os 60 dias de cura. Ambas as misturas de solo-cal apresentaram valores de RCS e RT inferiores aos valores dos solos naturais.
- b. A imersão dos solos naturais e das misturas de solo-cal com cura imediata levaram os corpos de prova de RCS e RT à desintegração. As misturas de solo-cal apresentaram alguma manutenção da integridade a partir do 7º dia de cura. Os valores das propriedades seguiram a tendência de acréscimo até os 28 dias e estabilização de 28 a 60 dias de cura apresentados nos ensaios sem imersão. No entanto, os valores foram significativamente inferiores quando comparados à condição não imersa.

As hipóteses adotadas para explicar peculiaridades no comportamento das misturas de solo-cal contempladas nesta pesquisa são reforçadas a seguir:

- a. O método de dosagem empregado pode não ser representativo para os solos, levando a utilização de teores de cal inferiores aos teores ideais. Desta forma, a cal adicionada ao solo seria capaz de desencadear as reações imediatas na mistura, porém, o teor de cal remanescente não seria suficiente para manter o pH alcalino e a quantidade de Ca^{++} necessários para a ocorrência de reações pozolânicas. Esta hipótese também é discutida nos estudos de Medeiros et al. (2019), no qual os autores também analisaram dois solos tropicais estabilizados com cal.
- b. A cal utilizada na pesquisa pode estar parcialmente carbonatada, levando a consideração de que somente uma parcela da cal adicionada ao solo estivesse reativa (parcela inferior ao teor de dosagem) e que outra parcela (inerte) atuaria como *filler* de baixa resistência.

As duas hipóteses seriam capazes de explicar os baixos valores das propriedades mecânicas (RCS e RT) dos solos estabilizados comparados aos solos naturais.

A confirmação das hipóteses poderia ser realizada através de análises químicas da cal utilizada ou da quantificação dos elementos químicos das misturas a partir de EDX (Espectrometria de Difração de Raios-X), assim como pela realização de ensaios mecânicos considerando teores superiores de cal.

CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo estudar o comportamento de um solo laterítico e um solo não laterítico estabilizados com cal para possível utilização como camadas de pavimentos, buscando compreender a técnica de estabilização, principalmente no que diz respeito: a) ao método de dosagem; b) à identificação da eficiência da cal na estabilização de solos distintos, e c) ao entendimento do efeito deletério da água na integridade da mistura. A partir dos resultados do programa experimental, foi possível obter algumas conclusões sobre a pesquisa:

- a. Quanto às características físicas: a adição de porcentagens de cal nos solos resultou em alterações das propriedades físicas ($\rho_{dmáx}$ e w_o), obtidas a partir do ensaio de compactação Proctor na energia Normal, o que confirmou tendências de estudos anteriores (MAIOR *et al.*, 1983; BUENO, 1996; EREN & FILIZ, 2009; BEHAK, 2011; TALLURI *et al.*, 2013).
- b. Quanto ao tipo de solo: é possível concluir que o solo LG', quando misturado à cal, apresenta melhor desempenho mecânico que o solo NG'. Pode-se notar também que o solo LG' utilizou menores quantidades de cal, em relação ao solo NG'.
- c. Quanto ao efeito deletério da água: os solos naturais não apresentaram resistência após imersão. Quando estabilizados, demonstraram capacidade em manter a integridade do corpo de prova a partir dos 7 dias de cura, o que pode ser atribuído às reações de cimentação desenvolvidas entre os solos e a cal. A imersão em água provocou mudanças importantes na RCS e RT dos solos, diminuindo-as consideravelmente. Para o módulo tangente a 50% da tensão de ruptura, o efeito deletério da água não é impactante, apresentando baixas reduções no valor desse indicador/fator.
- d. Quanto ao tempo de cura: pode-se concluir que um mínimo de 28 dias é adequado para se observar alterações nos solos. Neste estudo, em particular, variações importantes de propriedade começam a desacelerar a partir dos 28 dias.
- e. Quanto ao método de dosagem: conclui-se que embora seja um método rápido, pode não resultar no teor necessário de cal para estabilização de solos tropicais, conforme sugerido por Eades e Grim (1963).

SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A fim de responder questões que surgiram no desenvolvimento desta pesquisa, são sugeridos estudos que contemplem:

- a. Considerar mais de um método de dosagem para escolha do teor provável de cal, dando preferência a métodos que observem propriedades mecânicas das misturas como parâmetros de projeto.
- b. Realizar ensaios de análise química das cales utilizadas em estabilização de solos, com o intuito de verificar qual a porcentagem de Ca^{++} disponível, assim como o teor de CaCO_3 , na tentativa de controlar a qualidade do aditivo e de evitar cales carbonatadas.
- c. Variar no mínimo 2% abaixo e acima do teor de cal de projeto, a fim de verificar variações importantes no comportamento das misturas,
- d. Avaliar a capilaridade de solos naturais e estabilizados com cal na tentativa de entender o efeito da presença de água nesses materiais, uma vez que a capilaridade pode melhor representar a condição de subleitos e sub-base de pavimentos em serviço,
- e. Realizar um reconhecimento dos elementos químicos presentes no solo e nas misturas solo-cal a partir de ensaios de EDX (Espectrometria de Difração de Raios-X), tentando-se entender mudanças nos componentes químicos e formação de componentes peculiares da reação solo-cal.

Por fim, vale destacar que é importante continuar a investigação dos métodos de dosagem, assim como incluir ou desenvolver procedimentos de análises dos produtos solo-cal, porque ainda não há uma norma nacional para os procedimentos. Essa ausência de normas e procedimentos, além de prejudicar uma possível homogeneização de projetos de camadas de solo-cal, pode estar subestimando materiais apropriados para utilização em pavimentação.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6276-99a**: Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization. Philadelphia, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **NBR 6508**: Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
- BEHAK, L. Performance of Full-Scale Test Section of Low-Volume Road with Reinforcing Base Layer of Soil-Lime. **Transportation Research Record**. v. 2204, pp. 158-164. Washington, US: Transportation Research Board, 2011.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2008.
- BUENO, B. S. **Aspectos de Estabilização de Solos com Uso de Aditivos Químicos e de Inclusões Plásticas Aleatórias**. 1996. 99 p. Livre-Docência – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.
- CELAYA, M.; VEISI, M.; NAZARIAN, S.; PUPPALA, A. J. Accelerated Moisture Conditioning Process of Lime-Stabilized Clays. **Transportation Research Record**. v. 2204, pp. 130-139. Washington, US: Transportation Research Board, 2011.
- CRAIG, R. F. **Mecânica dos Solos**. Tradução de A. Kurban. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO. **DER M13-71**: Ensaio de Compactação de Solos. São Paulo, 1971.
- _____. **DER M196-89**: Classificação de Solos Tropicais Segundo a Metodologia MCT. São Paulo, 1989.
- DIAMOND, S.; KINTER, E. B. Mechanisms of Soil-Lime Stabilization: an Interpretative Review. **Highway Research Record**. N. 92. Washington, US: Transportation Research Board, 1965.
- EREN, S.; FILIZ, M. Comparing the Conventional Soil Stabilization Methods to the Consolidation System Used as an Alternative Admixture Matter in Isparta Daridere Material. **Construction and Building Materials**. v. 23, pp. 2473-2480. Amsterdam, NL: Elsevier, 2009.
- GRIM, R. E. **Clay Mineralogy**. 1. ed. New York, US: McGraw Hill, 1953.

GRUBBS, F. E. Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. *Technometrics*. v. 11. pp 1-21. Washington, US: American Statistical Association, 1969.

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

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization: Principles and Practice**. 1. ed. Melbourne, AU: Butterworths, 1972.

KLINSKY, L. M. G.; FARIA, V. C.; LEAL, A. D. **Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Estabilizados com Cal Hidratada**. 129p. Relatório de Pesquisa (CCR-ND-SCH-RTF-SET) – Agência Nacional de Transportes Terrestres, Brasília, 2014.

KOLAY, P. K.; AMINUR, M. R.; TAIB, S. N. L.; MOHD ZAIN, M. I. S. Stabilization of Tropical Peat Soil from Sarawak with Different Stabilizing Agents. **Geotechnical and Geological Engineering**. v. 29, pp. 1135-1141. New York, US: Springer, 2011.

LIMA, D. C. **Algumas Considerações Relativas à Aspectos da Estabilização dos Solos, em Particular à Estabilização Solo-Cal**. 1981. 171 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.

LITTLE, D. N. **Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime**. 1. ed. Austin, US: Lime Association of Texas, 1995.

_____. **Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates**. National Lime Association Report. 89 p. Arlington, US: NLA, 1999.

LITTLE, D. N.; MALES, E. H.; PRUSINSKI, J. R.; STEWART, B. Cementitious Stabilization. **79th Millennium Report Series**. 7 p. Washington, US: Transportation Research Board, 2000.

LITTLE, D. N.; NAIR, S. **Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials**. 57 p. Research Report (NCHRP Project 20-07) – Texas A&M University, College Station, US, 2009.

LOVATO, R. S. **Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal, Aplicado à Pavimentação**. 2004. 144 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

MAIOR, I. S.; FERREIRA, H. C.; LUCENA, F. B. Influência do Tipo de Cal (Calcítica ou Dolomítica) na Estabilização de Solos Lateríticos. In: 18^a Reunião Anual de Pavimentação. **Anais...** v. 2, pp. 519-532. Porto Alegre: ABPv, 1983.

MALLELA, J.; QUINTUS, H. V.; SMITH, K. L. **Consideration of Lime-Stabilized Layers in Mechanistic-Empirical Pavement Design**. Final Report Submitted to The National Lime Association. 36 p. Arlington, US: NLA, 2004.

MEDEIROS, A. A. L.; SILVA, M. F.; FURLAN, A. P. Avaliação Comparativa dos Métodos de Dosagem do pH e de Thompson para a Estabilização com Cal de Dois Solos Tropicais. In: 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. **Anais...** v. 1, pp. 2040-2051. Balneário Camboriú: ANPET, 2019.

MISRA, A. Stabilization Characteristics of Clays Using Class C Fly Ash. **Transportation Research Record**. v. 1611, pp. 46-54. Washington, US: Transportation Research Board, 1998.

MOLINA, C. E.; PARREIRA, A. B.; FERNANDES JUNIOR, J. L. Comportamento Mecânico de Misturas de Resíduo da Fabricação de Papel e Solo para a Utilização na Construção Rodoviária. In: 18º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET. **Anais...** v. 1, pp. 95-107. Florianópolis: ANPET, 2004.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Os Solos Tropicais Lateríticos e Saprolíticos e a Pavimentação. In: 18ª Reunião Anual de Pavimentação. **Anais...** v. 2, pp. 463-484. Porto Alegre: ABPv, 1983.

_____. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. 1. ed. São Paulo: Villibor, 1995.

OLIVEIRA, S. M. F. **Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas de Fosfogesso e Cal para Utilização na Construção Rodoviária**. 2005. 190 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PETRY, T.; WOHLGEMUTH, S. K. The Effects of Pulverization on the Strength and Durability of Highly Active Clay Soil Stabilized with Lime and Portland Cement. **Transportation Research Record**. v. 1190, pp. 38-45. Washington, US: Transportation Research Board, 1988.

PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARJA, S. Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. **Transportation Research Record**. v. 1652, pp. 215-227. Washington, US: Transportation Research Board, 1999.

PUPPALA, A. J.; MOHAMMAD, L. N.; ALLEN, A. Engineering Behavior of Lime-Treated Louisiana Subgrade Soil. **Transportation Research Record**. v. 1546, pp 24-31. Washington, US: Transportation Research Board, 1996.

SANTANA, H. Pontos Básicos e Elementares da Estabilização Granulométrica. In: 18ª Reunião Anual de Pavimentação. **Anais...** v. 2, pp. 417-462. Porto Alegre: ABPv, 1983.

SILVA JÚNIOR, W. S. **Estudo para a Utilização de Resíduo da Fabricação de Papel na Construção Rodoviária**. 2010. 210 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

SILVESTRE JÚNIOR; O. B. **Fosfogesso Estabilizado com Cimento para Aplicação na Construção Rodoviária: a Influência do Tipo de Cimento na Resistência e Deformabilidade da Mistura**. 2002. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SOLANKI, P.; ZAMAN, M. M.; DEAN, J. Resilient Modulus of Clay Subgrades Stabilized with Lime, Class C Fly Ash, and Cement Kiln Dust for Pavement Design. **Transportation Research Record**. v. 2186, pp 101-110. Washington, US: Transportation Research Board, 2010.

SVENSON, M. Estudo de Mistura Solo-Cal sob Carregamento Dinâmico. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. **Anais...** pp 385-414. Rio de Janeiro: UFRJ, 1981.

TAKEDA, M. C. **A Influência da Variação da Umidade Pós-Compactação no Comportamento Mecânico de Solos de Rodovias do Interior Paulista**. 2006. 241 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

TALLURI, N.; PUPPALA, A. J.; CHITTOORI, B. C. S.; GAILY, A. H.; HARRIS, P. Stabilization of High-Sulfate Soils by Extended Mellowing. **Transportation Research Record**. v. 2363, pp. 96-104. Washington, US: Transportation Research Board, 2013.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Mecânica dos Solos na Prática da Engenharia**. Tradução de A. J. C. Nunes e M. L. C. Campello. 1. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1962.

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

_____. Factors Influencing the Plasticity and Strength of Lime-Soil Mixtures. **Bulletin 492 – University of Illinois Bulletin**. v. 64, 20 p. Urbana, US: University of Illinois, 1967.

_____. Soil-Lime Mixtures for Construction of Low-Volume Roads. **TRB Special Report**. N. 160, pp. 149-165. Washington, US: Transportation Research Board, 1975.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Lime Stabilization: Reactions, Properties, Design, and Construction. **State of the Art Report 5**. 59 p. Washington, US: Transportation Research Board, 1987.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. **Pavimentos Econômicos: Tecnologia do Uso dos Solos Finos Lateríticos**. 1. ed. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico**. Disponível em: <http://www.mapadaobra.com.br/archives/FispqCalHidratadaTau.pdf>. Acesso em 28 de set. 2015.

WINTERKORN, H. F.; FANG, H. Y. Soil Technology and Engineering Properties of Soils. In: FANG, H. Y (Ed). **Foundation Engineering Handbook**. 2. ed. New York, US: Springer, 1991.

WINTERKORN, H. F.; PAMUKCU, S. Soil Stabilization and Grouting. In: FANG, H. Y (Ed). **Foundation Engineering Handbook**. 2. ed. New York, US: Springer, 1991.

YUSUF, F. A. M. S.; LITTLE, D. N.; SARKAR, S. L. Evaluation of Structural Contribution of Lime Stabilization of Subgrade Soils in Mississippi. **Transportation Research Record**. v. 1757, pp 22-31. Washington, US: Transportation Research Board, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Teste de Grubbs para RCS

As tabelas a seguir apresentam o teste de Grubbs para os resultados dos ensaios de RCS das misturas com solos laterítico (LG') e não laterítico (NG') nas condições imersa e não imersa. Os valores tachados representam *outliers* que foram excluídos da média final.

| Condição | Dias de cura | RCS [kPa] | RCSmédio [kPa] | Desvio padrão | G | RCSmédio definitivo [kPa] |
|----------|--------------|-----------|----------------|---------------|------|---------------------------|
| LG' | 0 | 312 | | | 0,23 | |
| | | 320 | 314 | 6 | 1,10 | 314 |
| | | 309 | | | 0,86 | |
| LG' + 4% | 0 | 182 | | | 1,14 | |
| | | 178 | 179 | 2 | 0,40 | 179 |
| | | 178 | | | 0,74 | |
| LG' + 4% | 7 | 213 | | | 1,13 | |
| | | 212 | 212 | 1 | 0,34 | 212 |
| | | 211 | | | 0,79 | |
| LG' + 4% | 28 | 266 | | | 1,14 | |
| | | 257 | 260 | 5 | 0,42 | 260 |
| | | 256 | | | 0,72 | |
| LG' + 4% | 60 | 274 | | | 0,43 | |
| | | 275 | 273 | 3 | 0,71 | 273 |
| | | 270 | | | 1,14 | |

Tabela A.1 RCS para misturas com LG' não imerso

| Condição | Dias de cura | RCS [kPa] | RCSmédio [kPa] | Desvio padrão | G | RCSmédio definitivo [kPa] |
|----------|--------------|-----------|----------------|---------------|---|---------------------------|
| LG' | 0 | 0 | | | - | |
| | | 0 | 0 | 0 | - | 0 |
| | | 0 | | | - | |
| LG' + 4% | 0 | 0 | | | - | |
| | | 0 | 0 | 0 | - | 0 |
| | | 0 | | | - | |

| | | | | | | |
|----------|----|-----|-----|---|------|-----|
| | | 103 | | | 0,06 | |
| LG' + 4% | 7 | 105 | 103 | 2 | 1,03 | 103 |
| | | 101 | | | 0,97 | |
| LG' + 4% | 28 | 132 | | | 1,08 | |
| | | 137 | 135 | 2 | 0,90 | 135 |
| | | 135 | | | 0,18 | |
| | | 134 | | | 1,11 | |
| LG' + 4% | 60 | 136 | 136 | 1 | 0,28 | 136 |
| | | 137 | | | 0,83 | |

Tabela A. 2 RCS para misturas com LG' imerso

| Condição | Dias de cura | RCS [kPa] | RCSmédio [kPa] | Desvio padrão | G | RCSmédio definitivo [kPa] |
|----------|--------------|-----------|----------------|---------------|------|---------------------------|
| NG' | 0 | 293 | | | 0,67 | |
| | | 293 | 294 | 2 | 0,48 | 293 |
| NG' + 6% | 0 | 297 | | | 1,15 | |
| | | 180 | | | 0,96 | |
| NG' + 6% | 7 | 184 | 185 | 5 | 0,07 | 185 |
| | | 190 | | | 1,03 | |
| NG' + 6% | 28 | 207 | | | 0,94 | |
| | | 210 | 211 | 4 | 0,11 | 211 |
| NG' + 6% | 60 | 215 | | | 1,05 | |
| | | 230 | | | 0,58 | |
| NG' + 6% | 28 | 230 | 231 | 1 | 0,58 | 230 |
| | | 233 | | | 1,15 | |
| NG' + 6% | 60 | 232 | | | 0,96 | |
| | | 239 | 235 | 4 | 1,04 | 235 |
| | | 235 | | | 0,08 | |

Tabela A.3 RCS para misturas com NG' não imerso

| Condição | Dias de cura | RCS [kPa] | RCSmédio [kPa] | Desvio padrão | G | RCSmédio definitivo [kPa] |
|----------|--------------|-----------|----------------|---------------|---|---------------------------|
| NG' | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 |
| | | 0 | | | - | |
| | | 0 | | | - | |

| | | | | | | |
|----------|----|-----|-----|---|------|-----|
| | | 0 | | | - | |
| NG' + 6% | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 |
| | | 0 | | | - | |
| | | 100 | | | 1,14 | |
| NG' + 6% | 7 | 95 | 97 | 3 | 0,75 | 97 |
| | | 96 | | | 0,39 | |
| | | 117 | | | 1,15 | |
| NG' + 6% | 28 | 122 | 121 | 3 | 0,54 | 122 |
| | | 123 | | | 0,61 | |
| | | 116 | | | 1,15 | |
| NG' + 6% | 60 | 125 | 122 | 5 | 0,62 | 125 |
| | | 125 | | | 0,54 | |

Tabela A.4 RCS para misturas com NG' imerso

APÊNDICE B

Teste de Grubbs para $E_{T,50\%}$

As tabelas a seguir apresentam o teste de Grubbs para os resultados do módulo tangente a 50% da tensão de ruptura das misturas com solos laterítico (LG') e não laterítico (NG') nas condições imersa e não imersa. Os valores tachados representam *outliers* que foram excluídos da média final.

| Condição | Dias de cura | ET,50% [MPa] | ET,50%médio [MPa] | Desvio padrão | G | ET,50%médio definitivo [MPa] |
|----------|--------------|--------------|-------------------|---------------|------|------------------------------|
| LG' | 0 | 19 | | | 1,14 | |
| | | 17 | 18 | 1 | 0,74 | 18 |
| | | 17 | | | 0,40 | |
| LG' + 4% | 0 | 14 | | | 1,04 | |
| | | 13 | 13 | 1 | 0,09 | 13 |
| | | 12 | | | 0,95 | |
| LG' + 4% | 7 | 17 | | | 0,66 | |
| | | 17 | 16 | 1 | 0,49 | 17 |
| | | 15 | | | 1,15 | |
| LG' + 4% | 28 | 21 | | | 1,13 | |
| | | 20 | 20 | 1 | 0,34 | 20 |
| | | 20 | | | 0,78 | |
| LG' + 4% | 60 | 20 | | | 0,45 | |
| | | 20 | 21 | 1 | 0,70 | 20 |
| | | 22 | | | 1,15 | |

Tabela B.1 $E_{T,50\%}$ para misturas com LG' não imerso

| Condição | Dias de cura | ET,50% [MPa] | ET,50% médio [MPa] | Desvio padrão | G | ET,50%médio definitivo [MPa] |
|----------|--------------|--------------|--------------------|---------------|------|------------------------------|
| LG' | 0 | 0 | | | - | |
| | | 0 | 0 | 0 | - | 0 |
| | | 0 | | | - | |
| LG' + 4% | 0 | 0 | | | - | |
| | | 0 | 0 | 0 | - | 0 |
| | | 0 | | | - | |
| LG' + 4% | 7 | 16 | | | 0,16 | |
| | | 16 | 16 | 0 | 1,07 | 16 |
| | | 17 | | | 0,91 | |

| | | +8 | | 1,15 | | |
|----------|----|----|----|------|------|----|
| LG' + 4% | 28 | 19 | 19 | 1 | 0,47 | 19 |
| | | 19 | | | 0,68 | |
| LG' + 4% | 60 | 19 | | | 0,00 | |
| | | 18 | 19 | 0 | 1,00 | 19 |
| | | 19 | | | 1,00 | |

Tabela B.2 $E_{T,50\%}$ para misturas com LG' imerso

| Condição | Dias de cura | ET,50% [MPa] | ET,50% médio [MPa] | Desvio padrão | G | ET,50%médio definitvo [MPa] |
|----------|--------------|--------------|--------------------|---------------|------|-----------------------------|
| NG' | 0 | 12 | | | 0,98 | |
| | | 13 | 13 | 1 | 0,04 | 13 |
| | | 14 | | | 1,02 | |
| NG' + 6% | 0 | 11 | | | 1,02 | |
| | | 13 | 12 | 1 | 0,03 | 12 |
| | | 14 | | | 0,98 | |
| NG' + 6% | 7 | 15 | | | 0,49 | |
| | | 14 | 15 | 1 | 1,15 | 15 |
| | | 15 | | | 0,66 | |
| NG' + 6% | 28 | 17 | | | 0,96 | |
| | | 18 | 17 | 0 | 1,03 | 17 |
| | | 17 | | | 0,07 | |
| NG' + 6% | 60 | 17 | | | 0,52 | |
| | | 17 | 17 | 1 | 0,63 | 17 |
| | | 19 | | | 1,15 | |

Tabela B.3 $E_{T,50\%}$ para misturas com NG' não imerso

| Condição | Dias de cura | ET,50% [MPa] | ET,50% médio [MPa] | Desvio padrão | G | ET,50%médio definitvo [MPa] |
|----------|--------------|--------------|--------------------|---------------|---|-----------------------------|
| NG' | 0 | 0 | | | - | |
| | | 0 | 0 | 0 | - | 0 |
| | | 0 | | | - | |
| NG' + 6% | 0 | 0 | | | - | |
| | | 0 | 0 | 0 | - | 0 |
| | | 0 | | | - | |

| | | | | | | |
|----------|----|----|----|---|------|----|
| | | 12 | | | 1,14 | |
| NG' + 6% | 7 | 13 | 13 | 1 | 0,41 | 13 |
| | | 13 | | | 0,73 | |
| | | 16 | | | 0,16 | |
| NG' + 6% | 28 | 16 | 16 | 0 | 0,91 | 16 |
| | | 16 | | | 1,07 | |
| | | 16 | | | 1,12 | |
| NG' + 6% | 60 | 16 | 16 | 0 | 0,32 | 16 |
| | | 17 | | | 0,80 | |

Tabela B.4 $E_{T,50\%}$ para misturas com NG' imerso

APÊNDICE C

Teste de Grubbs para RT

As tabelas a seguir apresentam o teste de Grubbs para os resultados dos ensaios de RT das misturas com solos laterítico (LG') e não laterítico (NG') nas condições imersa e não imersa. Os valores tachados representam *outliers* que foram excluídos da média final.

| Condição | Dias de cura | RCS [kPa] | RTmédio [kPa] | Desvio padrão | G | RTmédio definitivo [kPa] |
|----------|--------------|-----------|---------------|---------------|------|--------------------------|
| LG' | 0 | 28 | | | 0,87 | |
| | | 29 | 29 | 1 | 0,22 | 29 |
| | | 30 | | | 1,09 | |
| LG' + 4% | 0 | 13 | | | 1,13 | |
| | | 12 | 12 | 1 | 0,38 | 12 |
| | | 12 | | | 0,75 | |
| LG' + 4% | 7 | 18 | | | 0,23 | |
| | | 17 | 18 | 1 | 0,86 | 18 |
| | | 19 | | | 1,10 | |
| LG' + 4% | 28 | 28 | | | 0,59 | |
| | | 26 | 28 | 1 | 1,15 | 28 |
| | | 28 | | | 0,57 | |
| LG' + 4% | 60 | 30 | | | 0,86 | |
| | | 29 | 28 | 1 | 0,24 | 28 |
| | | 27 | | | 1,10 | |

Tabela C.1 RT para misturas com LG' não imerso

| Condição | Dias de cura | RCS [kPa] | RTmédio [kPa] | Desvio padrão | G | RTmédio definitivo [kPa] |
|----------|--------------|-----------|---------------|---------------|------|--------------------------|
| LG' | 0 | 0 | | | - | |
| | | 0 | 0 | 0 | - | 0 |
| | | 0 | | | - | |
| LG' + 4% | 0 | 0 | | | - | |
| | | 0 | 0 | 0 | - | 0 |
| | | 0 | | | - | |
| LG' + 4% | 7 | 7 | | | 1,00 | |
| | | 8 | 7 | 1 | 1,00 | 7 |
| | | 7 | | | 0,01 | |

| | | | | | | |
|----------|----|---|---|---|------|---|
| | | 8 | | | 1,12 | |
| LG' + 4% | 28 | 8 | 8 | 0 | 0,32 | 8 |
| | | 7 | | | 0,80 | |
| LG' + 4% | 60 | 7 | 8 | 1 | 0,73 | 8 |
| | | 9 | | | 1,14 | |

Tabela C.2 RT para misturas com LG' imerso

| Condição | Dias de cura | RCS [kPa] | RTmédio [kPa] | Desvio padrão | G | RTmédio definitivo [kPa] |
|----------|--------------|-----------|---------------|---------------|------|--------------------------|
| NG' | 0 | 31 | | | 0,77 | |
| | | 26 | 29 | 2 | 1,13 | 29 |
| | | 30 | | | 0,37 | |
| NG' + 6% | 0 | 15 | | | 0,74 | |
| | | 16 | 16 | 1 | 0,39 | 16 |
| | | 17 | | | 1,14 | |
| NG' + 6% | 7 | 15 | | | 1,00 | |
| | | 17 | 17 | 1 | 0,01 | 17 |
| | | 18 | | | 1,00 | |
| NG' + 6% | 28 | 21 | | | 1,10 | |
| | | 23 | 22 | 2 | 0,24 | 22 |
| | | 24 | | | 0,86 | |
| NG' + 6% | 60 | 25 | | | 1,14 | |
| | | 24 | 24 | 1 | 0,75 | 24 |
| | | 24 | | | 0,39 | |

Tabela C.3 RT para misturas com NG' não imerso

| Condição | Dias de cura | RCS [kPa] | RTmédio [kPa] | Desvio padrão | G | RTmédio definitivo [kPa] |
|----------|--------------|-----------|---------------|---------------|------|--------------------------|
| NG' | 0 | 0 | | | - | |
| | | 0 | 0 | 0 | - | 0 |
| NG' + 6% | 0 | 0 | | | - | |
| | | 0 | 0 | 0 | - | 0 |
| NG' + 6% | 7 | 5 | | | 0,00 | |
| | | 5 | 5 | 0 | 1,00 | 5 |
| | | 4 | | | 1,00 | |

| | | | | | | |
|----------|----|---|---|---|------|---|
| | | 6 | | | 1,00 | |
| NG' + 6% | 28 | 6 | 6 | 0 | 0,01 | 6 |
| | | 5 | | | 1,00 | |
| | | 6 | | | 0,34 | |
| NG' + 6% | 60 | 6 | 7 | 1 | 0,78 | 7 |
| | | 8 | | | 1,13 | |

Tabela C.4 RT para misturas com NG' imerso

MATHEUS FRANCISCO DA SILVA - Engenheiro Civil e Mestre em Engenharia de Transportes pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP). De 2016 a 2018, atuou como Professor no Centro Universitário Moura Lacerda, em Ribeirão Preto-SP. No período de 2021 a 2022, realizou estágio como Pesquisador Visitante na Université Gustave Eiffel, em Nantes, França. Atualmente é Doutorando em Engenharia de Transportes (EESC-USP) e Professor no Centro Universitário Unifafibe (Bebedouro-SP). Sua linha de pesquisa envolve temas como estabilização química de solos e avaliação de agregados reciclados na pavimentação. <http://lattes.cnpq.br/3361166573062063>. <https://orcid.org/0000-0001-6976-3223>

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO-CAL:

ANÁLISE DE UM SOLO LATERÍTICO
E UM SOLO NÃO LATERÍTICO

- 🌐 www.atenaeditora.com.br
- ✉ contato@atenaeditora.com.br
- 📷 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
- 👤 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS SOLO-CAL:

ANÁLISE DE UM SOLO LATERÍTICO
E UM SOLO NÃO LATERÍTICO

- 🌐 www.atenaeditora.com.br
- ✉ contato@atenaeditora.com.br
- 📷 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
- 👤 www.facebook.com/atenaeditora.com.br