ALISSON ALBERTO DE LIMA MEDEIROS

**Contribuição ao estudo da dosagem de cal para a estabilização de um solo de
comportamento laterítico e um não laterítico**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes.

Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Ana Paula Furlan

São Carlos

2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

D488c De Lima Medeiros, Alisson Alberto
Contribuição ao estudo da dosagem de cal para a
estabilização de um solo de comportamento laterítico e
um não laterítico / Alisson Alberto De Lima Medeiros;
orientadora Ana Paula Furlan. São Carlos, 2017.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em
Infraestrutura de Transportes -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

1. Estabilização de solos. 2. Dosagem solo-cal. 3.
Método de Thompson. 4. Método do pH. 5. Solos
lateríticos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ALISSON ALBERTO DE LIMA MEDEIROS.**

Título da dissertação: "Contribuição ao estudo da dosagem de cal para estabilização de um solo de comportamento laterítico e um não laterítico".

Data da defesa: 28/11/2017.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profa. Dra. **Ana Paula Furlan**
(**Orientadora**)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Profa. Dra. **Lilian Ribeiro de Rezende**
(Universidade Federal de Goiás/UFG)

Aprovado

Prof. Dr. **Ricardo Almeida de Melo**
(Universidade Federal da Paraíba/UFPB)

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes:

Profª. Associada **Ana Paula Camargo Larocca**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Aos meus pais, Conceição e Alberto.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Conceição e Alberto, pelo amor incondicional e apoio nas minhas escolhas.

A minha orientadora Prof.^a Doutora Ana Paula Furlan, por todo o conhecimento transmitido e por toda paciência, confiança e dedicação depositadas em mim durante a realização desse trabalho.

Aos Professores do Departamento de Engenharia de Transportes da EESC/USP, pelos conhecimentos e aprendizado transmitidos durante as aulas.

Aos técnicos do Laboratório de Estradas da EESC/USP, Antônio Carlos Gigante, João Domingos Pereira Filho e Paulo Toyama, pelos ensinamentos transmitidos e pelo apoio na realização dos ensaios.

Ao CNPq pela bolsa de estudos concedida.

Aos amigos do STT pelas conversas e momentos de descontração à espera café e a Benê por fazer o café.

Aos que dividiram comigo não só as frustrações de uma pós-graduação, bem como a de uma pia cheia de pratos sujos, de uma geladeira vazia ou de uma barata voadora no banheiro: Anthony, Arthur, Andressa e Flávio.

Aos amigos da República Alambique pelos chás da tarde e pelas reuniões que fizeram a minha estadia em São Carlos a melhor possível.

MEDEIROS, A. A. L. (2017) **Contribuição ao estudo da dosagem de cal para a estabilização de um solo de comportamento laterítico e um não laterítico**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Esta pesquisa teve como objetivo estudar a dosagem de cal para a estabilização de um solo de comportamento laterítico (LG') e outro não laterítico (NG'). Para a estabilização foram utilizadas duas cales dolomíticas (CH-I e CH-III) e aplicados dois métodos de dosagem de solo-cal (ASTM D 6276 e o método de Thompson). Os teores de cal indicados pelos métodos foram baixos e não convergiram para o mesmo valor, por isso, para os ensaios mecânicos foram adotados os teores de 5%, 7,5% e 10% de cal. Os corpos de prova de solo-cal foram curados em uma estufa ventilada a uma temperatura controlada de 50°C por 0, 2, 7 e 14 dias. No programa experimental, foram feitas avaliações de propriedades mecânicas, de resistência à compressão simples (RCS), sem e após imersão, e do módulo de resiliência (MR); e avaliações de microestruturas, a partir de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e de resultados de difração de raios X (DRX). Os resultados do estudo das propriedades mecânicas mostraram que: (i) com o teor de cal adequado as misturas solo-cal apresentaram importantes incrementos de resistência, sendo que após 14 dias de cura, as RCS aumentaram 3,5 a 4 vezes para as misturas NG'+10% CH-I e LG'+10% CH-I, respectivamente; (ii) houve manutenção de uma parcela de RCS mesmo após imersão em água (por 4h), o que foi atribuído à ocorrência das reações cimentantes; (iii) a adição de cal aumentou o MR do solo independente do tipo e do teor de cal empregado e mudou o comportamento resiliente da mistura, que passou a se comportar como material granular. Com relação à análise da microestrutura, pode-se constatar (iv) mudança de textura do solo e formação de compostos cimentantes, a partir das imagens de MEV; (v) alterações na composição química das misturas ao longo do período de cura, como notado nos resultados de EDS; e (vi) a formação de novos picos nos difratogramas dos materiais, evidenciando a formação de novos compostos minerais. As misturas estudadas nessa pesquisa, no geral, mostraram bons resultados após a estabilização e ainda que podem ser usadas como camadas de pavimentos se a dosagem for feita de maneira adequada.

Palavras-chave: Estabilização de solos; dosagem solo-cal; método de Thompson; método do pH; solos tropicais

ABSTRACT

MEDEIROS, A. A. L. (2017) **Contribution to the study to estimate the lime content for stabilization of a lateritic and a non-lateritic soil.** 2017. MSc Dissertation, São Carlos School of Engineering, University of Sao Paulo, São Carlos, 2017.

This research aimed to study the lime content for stabilization of a lateritic (LG') and a non-lateritic (NG') soil. For the stabilization, two dolomitic limes (CH-I and CH-III) were used and two soil-lime procedures to estimate de lime content were applied (ASTM D 6276 and Thompson's method). The lime contents indicated by the methods were low and did not converge to the same value, therefore, for the mechanical tests were adopted the lime contents of 5%, 7.5% and 10% of lime. Soil-lime samples were cured in an air circulated oven at a controlled temperature of 50°C for 0, 2, 7 and 14 days. In the experimental program, evaluations of mechanical properties, unconfined compressive strength (UCS), without and after immersion in water, and the resilience modulus (RM) were evaluated; reviews of microstructures, images from scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS) and results of X-ray diffraction (XRD) were analysed. The results of the mechanical properties showed that: (i) with the appropriate lime content, the soil-lime mixtures presented significant increases in strength, and after 14 days of cure, the UCS increased by 3.5 to 4 times for the mixtures NG ' + 10% CH-I and LG' + 10% CH-I, respectively; (ii) there was maintenance of a UCS portion even after immersion in water (for 4 h), which was attributed to the occurrence of cementing reactions; (iii) addition of lime increased the RM of the soil independent of the type and lime content applied and changed the resilient behavior of the mixture, which behave as a granular material. Regarding the analysis of the microstructure, we can verify (iv) change of soil texture and formation of cementing compounds, from SEM images; (v) changes in the chemical composition of the mixtures over the curing period, as noted in the EDAX results; and (vi) the formation of new peaks in the diffractograms of the materials, evidencing the formation of new mineral compounds. The mixtures studied in this research, in general, showed good results after stabilization and that can be used as layers of pavements if the properly content of lime is applied.

Keywords: Soil stabilization; soil-lime design; Thompson's method; pH method; tropical soils

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Método de dosagem de Thompson para estabilização de solos com cal (Adaptado: THOMPSON, 1970)	21
Figura 2 - Talude de corte de onde foram coletados os solos	29
Figura 3 - Curvas granulométricas dos solos	31
Figura 4 - Classificação MCT	32
Figura 5 - Curvas de compactação e saturação 100%	33
Figura 6 - Misturas de solo-cal utilizadas no método do pH (a) e medidor de pH (b)	44
Figura 7 - Dosagem método do pH	45
Figura 8 - Curvas de compactação solo LG'	46
Figura 9 - Curvas de compactação solo NG'	46
Figura 10 - Mistura LG'+5% curados a 25°C e 50°C	47
Figura 11 - Mistura NG'+5% curados a 25°C e 50°C	47
Figura 12 - RCS - Método de dosagem Thompson	48
Figura 13 - RCS das misturas - LG'	53
Figura 14 - RCS das misturas - NG'	54
Figura 15 - RCS das misturas em função do teor de cal- LG'	55
Figura 16 - RCS das misturas em função do teor de cal- NG'	55
Figura 17 - Variação do E_0 em função do teor de cal (após imersão)	59
Figura 18 - Representação do modelo composto para o solo LG'	61
Figura 19 - Representação do modelo composto para o solo NG'	61
Figura 20 - Representação do modelo composto para a mistura LG'+10%CH-I	62
Figura 21 - Representação do modelo composto para a mistura NG'+10%CH-I	62
Figura 22 - MR das misturas - solo LG'	64
Figura 23 - MR das misturas - solo NG'	65
Figura 24 - Imagens com aumento de 3.000x - LG'	68
Figura 25 - Imagens com aumento de 7.500x - LG'	69
Figura 26 - Imagens com aumento de 3.000x - NG'	70
Figura 27 - Imagens com aumento de 7.500x - NG'	71
Figura 28 - Resultados DRX solo LG' e misturas LG'+10%CH-I	74
Figura 29 - Resultados DRX solo NG' e misturas NG'+10%CH-I	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaios realizados para a caracterização e classificação dos solos	30
Tabela 2 - Caracterização física dos solos	31
Tabela 3 - Coeficientes da classificação MCT.....	32
Tabela 4 - Classificação dos solos estudados.....	33
Tabela 5 - Concentração de CaO das cales utilizadas (VOTORANTIM,2016; Mineração São Judas/Anexo A).....	34
Tabela 6 - Composição química das cales (EDS).....	35
Tabela 7 - Dimensões dos corpos de prova.....	36
Tabela 8 - Quantidade de corpos de prova compactados para uma mistura	37
Tabela 9 - Pares de tensões aplicados no ensaio de MR.....	39
Tabela 10 - Modelos matemáticos para cálculo do MR.....	40
Tabela 11 - Estrutura do pavimento hipotético	40
Tabela 12 - pH das misturas solo-cal	44
Tabela 13 - Parâmetros de compactação usados no método de dosagem de Thompson	46
Tabela 14 - IP dos solos melhorados com cal.....	49
Tabela 15 - Teores de cal para estabilização.....	49
Tabela 16 - Composição das misturas solo-cal.....	51
Tabela 17 - RCS dos solos no estado natural.....	52
Tabela 18 - Resistência à compressão simples (kPa).....	52
Tabela 19 - Resistência à compressão simples (kPa) - (Após imersão).....	56
Tabela 20 - RCS (kPa) sem imersão e após imersão	57
Tabela 21 - Módulo tangente inicial (MPa)	58
Tabela 22 - Ganho relativo de rigidez das misturas após 14 dias de cura	59
Tabela 23 - Média de R^2 dos modelos de MR	60
Tabela 24 - MR por tensões definidas dos solos no estado natural	63
Tabela 25 - MR por tensões definidas das misturas solo-cal.....	64
Tabela 26 - MR e tensões atuantes no pavimento hipotético.....	66
Tabela 27 - Composição química das misturas com 10% de cal CH-I.....	72
Tabela 28 - Composição química das misturas com 10% de cal CH-III	72

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Alumínio
Ca ⁺⁺	Cálcio livre
CaO	Óxido de cálcio
Fe	Ferro
Mg	Magnésio
Si	Silício
Pi	Perda de massa por imersão
c'	Argilosidade dos solos
R ²	Coeficiente de determinação
e'	Caráter laterítico
E ₀	Módulo tangente inicial
N	Coeficiente de Poisson
ρ _{dmax}	Massa específica seca máxima
ρ _s	Massa específica dos solos
w ₀	Umidade ótima
σ ₃	Tensão confinante
σ _d	Tensão desvio

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society of Testing Materials</i>
CAH	Aluminatos hidratados de cálcio
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CP	Corpo de prova
CSH	Silicato hidratado de cálcio
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difratometria de raio X
EDS	Espectrometria de energia dispersiva
GC	Grau de compactação
LG'	Solo argiloso laterítico
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
LS	Linha de seixos
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducers</i>
MCT	Miniatura Compactado Tropical
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MR	Módulo de resiliência
NG'	Solo argiloso não laterítico
IP	Índice de plasticidade
RCS	Resistência à compressão simples
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TRB	<i>Transportation Research Board</i>

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Objetivos.....	14
1.2. Estrutura do trabalho	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. Estabilização de solos.....	15
2.2. A cal e suas reações com o solo	16
2.3. Métodos de dosagem	18
2.3.1. Método do pH.....	19
2.3.2. Método de Thompson.....	19
2.4.1. Parâmetros de compactação.....	22
2.4.2. Resistência	22
2.4.3. Comportamento resiliente	25
2.4.4. Microestrutura	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1. Solos	29
3.1.1. Seleção, coleta e preparação	29
3.1.2. Caracterização e classificação	30
3.1.3. Ensaio de compactação.....	33
3.2. Cal.....	34
3.3. Métodos	35
3.3.1. Dosagem do teor de cal	35
3.3.2. Compactação dos corpos de prova para os ensaios mecânicos	35
3.3.3. Resistência à compressão simples (RCS).....	37
3.3.4. Módulo de resiliência (MR)	39
3.3.5. Microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e difração de raios X (DRX).....	41
4. RESULTADOS DOS MÉTODOS DE DOSAGEM	43
4.1. Dosagem do teor de cal	43
4.1.1. Método de Eades e Grim	43
4.1.2. Método de Thompson.....	45

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	51
5.1. Resistência à compressão simples.....	51
5.1.1. RCS sem imersão.....	52
5.1.2. RCS após imersão.....	56
5.1.3. Módulo tangente inicial (E_0).....	57
5.2. Módulo de resiliência.....	60
5.2.1. MR por tensões definidas.....	63
5.2.2. MR por tensões do pavimento hipotético.....	65
5.3 Microscopia eletrônica de varredura.....	67
5.4 Espectroscopia de energia disperssiva.....	71
5.5 Difração de raios x.....	73
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	76
6.1 Sugestões para pesquisas futuras.....	78
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
ANEXO A.....	85
ANEXO B.....	89
ANEXO C.....	94
ANEXO D.....	99

1. INTRODUÇÃO

A construção de pavimentos consome uma grande quantidade de materiais naturais como asfalto, agregados pétreos e solos. Visando a redução dos custos e a sustentabilidade da obra, procura-se utilizar materiais que estejam localmente disponíveis. No entanto, em alguns casos, esses materiais não atendem às exigências mínimas de projeto para uso como camadas de pavimentos.

Em determinadas regiões, a escassez de agregados e a baixa capacidade de suporte dos solos faz com que se busquem alternativas para a construção de pavimentos. Uma delas é a exploração de outras jazidas, porém, essa opção pode inviabilizar economicamente a obra por conta dos gastos adicionais com transporte de material. Outra opção é melhorar os solos locais, alterando suas propriedades, o que pode resultar em um novo material que atenda aos requisitos mínimos do projeto.

Um recurso para a melhoria de solos é a estabilização. O uso da cal para a estabilização química é uma prática comum na pavimentação e já mostrou potencial para a melhoria de propriedades físicas e mecânicas de solos antes considerados inapropriados para uso como camadas de pavimentos. Os solos estabilizados passam a ser alternativas práticas, sustentáveis e de baixo custo.

Os Departamentos de Estradas de Rodagem de São Paulo e do Paraná possuem especificações técnicas de serviços e materiais que regulamentam a construção de bases e sub-bases de pavimentos de solo-cal, porém não recomendam um procedimento de dosagem do teor de cal necessário para a estabilização.

No Brasil, de maneira geral, a dosagem do teor de cal a ser incorporado ao solo é feita de modo empírico ou se baseia em experiências bem-sucedidas com solos de classes semelhantes. Porém, dessa forma é difícil determinar quais seriam os valores mínimos de resistência e seu comportamento mecânico ao longo do tempo. A falta de um método brasileiro de dosagem de cal para a estabilização de solos justifica a necessidade de pesquisas que busquem compreender melhor os fatores influentes nesse processo de estabilização.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é avaliar a aplicação dos métodos de dosagem de cal mais usados na pavimentação para estabilização de um solo de comportamento laterítico e um não laterítico.

Com base nessa pesquisa, pretende-se: a) empregar os métodos de dosagem de Eades e Grim (1966) e de Thompson (1970) na determinação do teor de cal para a estabilização dos solos utilizados; b) estudar o comportamento de dois solos de características geotécnicas diferentes quando estabilizados com cal; c) entender o efeito de dois diferentes tipos de cales na estabilização de solos; d) avaliar propriedades de interesse da engenharia em diferentes condições de cura; e e) observar as mudanças que a adição de cal provoca na microestrutura dos solos estudados.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em seis capítulos. No primeiro capítulo, encontra-se uma breve introdução ao estudo e o objetivo do trabalho. O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica, abordando aspectos relevantes para o desenvolvimento da pesquisa. No terceiro capítulo são apresentados os materiais e os métodos que compõem o programa experimental desenvolvido. No quarto capítulo são apresentados e comentados os resultados dos métodos de dosagem de cal para a estabilização dos solos. No quinto capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios mecânicos e das análises microestruturais. No sexto capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas desse trabalho e algumas sugestões para pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas algumas considerações a respeito das características de solos tropicais e sua estabilização com cal. Com ênfase nos mecanismos de reação que acontecem com adição de cal e nos efeitos que a estabilização provoca nas propriedades dos solos.

2.1. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A estabilização de solos é um método usado para modificar e melhorar propriedades de engenharia, no que diz respeito à estabilidade, resistência, durabilidade e permeabilidade. Com isso, materiais de características indesejáveis podem atender aos requisitos mínimos do projeto a ser executado (INGLES & METCALF, 1972).

Existem dois tipos de estabilização: a física e a química. Na estabilização física as propriedades do solo são melhoradas por meio da compactação ou do ajuste da granulometria. Por outro lado, na estabilização química um ou mais aditivos são misturados ao solo, resultando em reações químicas entre os constituintes na presença de água (WINTERKORN & PAMUKCU, 1991).

Os principais aditivos utilizados para a estabilização química de solos são o cimento Portland e a cal. Esses materiais quando misturados ao solo podem conferir aumento de resistência, melhoria da trabalhabilidade e redução da variação volumétrica (LIMA, 1981). Em alguns países da América e da Europa, rejeitos industriais como a cinza volante também vêm sendo utilizados com sucesso para a estabilização química de solos (MISRA, 1998).

As exigências de projeto e o tipo de solo são os fatores que determinam qual aditivo será usado na estabilização. O cimento Portland confere ao solo ganho imediato de resistência, melhora de trabalhabilidade e é mais aplicado em solos granulares. A estabilização com cal proporciona aumento de resistência em longo prazo, melhora de trabalhabilidade e sua aplicação é mais eficiente em solos de granulometria fina (LITTLE, 1995).

2.2. A CAL E SUAS REAÇÕES COM O SOLO

Algumas das propriedades e características dos solos que podem influenciar nas reações com a cal são: pH, teor de matéria orgânica, mineralogia da fração argila, drenagem natural, presença em excesso de sódio permutável, grau de intemperismo, presença de carbonatos e/ou sulfatos, ferro extraível, relação sílica/alumina e relação sílica/sesquióxidos (DIAMOND & KINTER, 1965; EADES & GRIM, 1966; THOMPSON, 1970; TRB, 1987; ATTOH-OKINE, 1995; LITTLE, 1995).

A adição de cal a um solo de granulometria fina geralmente causa redução do índice de plasticidade, melhoria na trabalhabilidade, redução na expansão e pode provocar aumento na resistência. As reações de trocas catiônicas, floculação e aglomeração, carbonatação e as reações pozolânicas são responsáveis pelas mudanças nas propriedades do solo (THOMPSON, 1966).

A *troca catiônica* inicia o processo de estabilização assim que a cal é misturada ao solo. Segundo Grim (1953), a série liotrópica de íons, $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+}$, determina a ordem das trocas catiônicas que ocorrem nos solos. De acordo com essa série, assumindo igual concentração, qualquer cátion tende a substituir os cátions a sua esquerda e cátions monovalentes são usualmente substituídos por cátions multivalentes. Quando uma quantidade suficiente de cal é misturada ao solo, cria-se uma grande concentração de cátions de cálcio livre (Ca^{++}) que serão adsorvidos nas superfícies dos argilominerais. As reações de trocas catiônicas resultam na redução do tamanho da camada difusa de água, fazendo com que as partículas se aproximem mais umas das outras (TRB, 1987).

As reações de *floculação e aglomeração* causam a aglutinação das partículas finas do solo, resultando em partículas de maiores dimensões e mudanças na textura. Prusinski e Battacharja (1999) estudaram alguns tipos de argilas e observaram mudanças texturais que alteraram a estrutura lamelar das argilas para estruturas de orientação aleatórias. As reações de trocas catiônicas, floculação e aglomeração são responsáveis pela redução na plasticidade, melhoria da trabalhabilidade e aumento de resistência em curto prazo.

A *carbonatação* é a reação entre os óxidos ou os hidróxidos de cálcio ou magnésio, presentes na cal, e o dióxido de carbono presente no ar. Essa reação forma um carbonato, de cálcio ou de magnésio, que é um agente cimentante fraco e relativamente insolúvel. Por esse motivo, a carbonatação é uma reação indesejável e devem ser tomadas medidas para minimizá-la

durante o processo de estabilização (DE CARVALHO, 1979). Segundo Le Roux (1969), a compactação logo após a execução da mistura é indispensável para evitar a carbonatação, pois tem o objetivo de reduzir a porosidade do material, diminuindo a circulação interna do ar.

As *reações pozolânicas* ocorrem entre a cal e a sílica e/ou alumina no solo na presença de água. Essas reações formam silicatos hidratados de cálcio (CSH) ou aluminatos hidratados de cálcio (CAH) que são os compostos cimentantes responsáveis pelo aumento de resistência das misturas (EADES & GRIM, 1966). Em quantidades suficientes, a adição de cal ao solo fornece cátions Ca^{++} livres e aumenta o pH da mistura para aproximadamente 12,4. Esse meio de pH alcalino solubiliza a sílica e a alumina das superfícies das partículas argilosas, deixando-as disponíveis para reagir com o cálcio livre. Essa reação continua enquanto houver $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reagindo e sílica disponível no solo.

Segundo Ingles e Metcalf (1972), as reações pozolânicas formam géis de CSH que cobrem as partículas de solo, bloqueando os vazios. Os géis cristalizam lentamente e cimentam as partículas vizinhas, como efeitos se têm o aumento da resistência e da durabilidade da mistura. Fatores como o tipo de intemperismo sofrido pelo solo, mineralogia da fração argila, teor de matéria orgânica, drenagem natural do solo e a presença de carbonatos podem influenciar na liberação de sílica e alumina e, conseqüentemente, na intensidade do ganho de resistência da mistura (TRB, 1987).

Para De Carvalho (1988), a grande concentração de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (Fe e Al) presente nos solos lateríticos torna a análise das reações pozolânicas um processo ainda mais complexo. Não há consenso na literatura sobre como o Fe atua nas reações pozolânicas. A influência da presença de Fe depende da sua ocorrência nos solos, assim, se ocorrer recobrimdo as superfícies do argilomineral ou como agente cimentante, seu efeito será negativo porque a presença de sesquióxidos nas superfícies do argilomineral inibe as reações entre o cálcio e a sílica. Porém, se o Fe ocorrer como partículas discretas, sua presença não influenciará negativamente as reações pozolânicas.

Castro (1995) afirmou que é possível que óxi-hidróxidos de ferro e matéria orgânica bloqueiam parcial ou totalmente a superfície dos cristais dos argilominerais, ocasionando perda de reatividade à cal. Alcântara et al. (1995) estudaram a estabilização de três tipos de solo com 10% de cal cálcica e constatou que o solo com maior teor de argila, maior porcentagem de Fe_2O_3 e de matéria orgânica apresentou os menores valores de resistência e rigidez nos ensaios mecânicos.

Como observado por diversos autores, as composições química e mineralógica dos solos têm grande influência nas reações que ocorrem após a adição de cal e, conseqüentemente, no desempenho mecânico da mistura solo-cal. Visto isso, fica evidente a necessidade de se entender a natureza mineralógica do solo a ser estabilizado.

2.3. MÉTODOS DE DOSAGEM

Os métodos de dosagem para a estabilização de solos com cal são geralmente baseados em análises do efeito de teores pré-fixados de cal sobre determinadas características e propriedades do solo (plasticidade, expansão, resistência e durabilidade). Para Thompson (1966), o objetivo da estabilização determina qual propriedade deve ser melhorada e, a partir dos resultados de testes laboratoriais, é determinada uma quantidade apropriada de cal para a mistura.

O relatório da TRB (1987) apresentou uma ressalva importante com relação à estabilização de solos com cal. Visto que o teor de cal das misturas é a principal variável que pode ser alterada no processo de estabilização, para algumas indicações de uso e alguns tipos de solos, misturas solo-cal podem não atender aos requisitos mínimos de projeto independentemente do teor de cal utilizado.

Para Little (1995), os critérios adotados para a determinação do teor de cal para a estabilização podem ser divididos em duas grandes categorias:

- (i) a primeira categoria é relacionada a situações onde os principais objetivos são a redução do índice de plasticidade, melhoria na trabalhabilidade e redução da expansão. A melhoria dessas propriedades é decorrente das reações de trocas catiônicas, floculação e aglomeração que ocorrem poucas horas após a mistura;
- (ii) a segunda categoria consiste na avaliação do aumento de resistência, causado pelas reações pozolânicas, que ocorrem na mistura em longo prazo, como é o caso da estabilização de solos para o uso como sub-bases e bases de pavimentos.

Devido às diversas condições ambientais, os critérios de dosagem desenvolvidos para uso com um determinado objetivo e para um determinado tipo de solo não devem ser aplicados para solos que apresentem gênese e/ou peculiaridades de propriedades diferentes sem estudos prévios (LITTLE, 1995).

2.3.1. MÉTODO DO PH

O procedimento do método de dosagem do pH foi proposto por Eades e Grim (1966) e consiste em adicionar cal suficiente ao solo até alcançar uma mistura com um pH de 12,4. Para esses pesquisadores, a manutenção do pH nesse nível garantirá a ocorrência das reações pozolânicas entre o solo e a cal, o que acarretará no ganho de resistência da mistura.

Para a execução do método, são separadas amostras equivalentes a 25 gramas de solo seco passado na peneira de abertura 0,425 mm e acondicionadas em cinco frascos, onde são adicionadas a cada amostra porcentagens de 2%, 3%, 4%, 5% e 6% de cal, em relação ao solo seco, e 100 ml de água destilada. Os frascos são agitados por 30 segundos a cada 10 minutos durante um período de 1 hora. Após esse período, é medido o pH das amostras.

O teor ótimo para a estabilização do solo é a porcentagem de cal da amostra que primeiro atingir um pH de 12,4. Se nenhuma amostra atingir o pH de 12,4 e duas amostras consecutivas apontarem o valor de 12,3; a menor porcentagem que atingir esse valor será o teor de cal adotado para estabilizar o solo.

O método do pH apresenta duas limitações: a) não determina se o solo reagirá com a cal para produzir um aumento significativo de resistência e b) não exige monitoramento de dados de resistência para avaliar a qualidade da mistura. Como o ganho de resistência está relacionado à formação de silicatos hidratados de cálcio, e sua formação varia de acordo com os componentes mineralógicos do solo, ensaios mecânicos são recomendados para mensurar a porcentagem de aumento de resistência (TRB, 1987).

2.3.2. MÉTODO DE THOMPSON

O método desenvolvido por Thompson (1970) inicialmente compara a resistência à compressão simples (RCS) do solo natural com a da mistura solo-cal curada, sendo os corpos de prova compactados na umidade ótima (w_0) e massa específica seca máxima (ρ_{dmax}). A porcentagem de cal incorporada ao solo nessa etapa pode ser a indicada pelo método do pH, caso esse método tenha sido realizado previamente, ou 5% de massa de cal em relação ao solo seco.

A cura dos corpos-de-prova de solo-cal consiste de submetê-los a uma temperatura de aproximadamente 24°C por 28 dias ou 50°C por um período de 2 dias. Segundo Thompson (1970), essas são condições equivalentes de cura, visto que o aumento da temperatura acelera

o processo de formação dos compostos cimentantes. Após a cura são determinados os valores da resistência à compressão simples (RCS) para observar a reatividade pozolânica do solo. Se o aumento de RCS for maior que 345kPa, o solo é classificado como reativo à cal, caso contrário, o solo é classificado como não reativo. O valor do ganho de RCS (345kPa) que determina a reatividade do solo à cal é oriundo de pesquisas realizadas com solos do estado de Illinois – EUA (THOMPSON, 1966).

Misturas de cal e solos reativos são denominadas de mistura solo-cal. São sistemas cimentados que podem apresentar alta resistência e ser empregados em camadas de base e sub-base de pavimentos. Portanto, para esse caso, a determinação do teor ótimo de cal é baseada em uma análise dos resultados de RCS para diferentes teores de cal no solo.

Solos não reativos tratados com cal são denominados de solos modificados com cal. Thompson (1970) recomendou este tipo de tratamento como meio para acelerar a construção ou melhorar as propriedades do subleito, nesse caso o teor ótimo de cal da mistura é determinado pela avaliação do efeito de diferentes teores de cal no índice de plasticidade (IP) do solo. O fluxograma da Figura 1 apresenta um resumo do processo de dosagem.

Após a determinação do teor ótimo de cal, a RCS da mistura solo-cal deve ser comparada às exigências de projeto. Para solos modificados com cal o teste de CBR é opcional, porém importante para a avaliação da estabilidade e expansão da mistura quando usadas como melhoria de subleito (THOMPSON, 1970). Apesar da recomendação do autor, nessa pesquisa optou-se por realizar o ensaio de módulo de resiliência (MR) das misturas, pois nos novos métodos de dimensionamento de pavimentos, o CBR vem sendo substituído pelo MR como parâmetro de projeto.

Figura 1 - Método de dosagem de Thompson para estabilização de solos com cal (Adaptado: THOMPSON, 1970)

2.4. EFEITOS DA ADIÇÃO DE CAL AO SOLO

A adição de cal confere ao solo alterações nas suas características físicas, nas propriedades mecânicas e na sua microestrutura. Os solos adequadamente estabilizados geralmente apresentam: alterações na composição química, mudanças texturais na matriz, diminuição do índice de plasticidade, melhora na trabalhabilidade e aumentos de resistência e rigidez.

2.4.1. PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO

Para uma mesma energia de compactação, as misturas de solo-cal apresentam maior valor de umidade ótima e menor valor de massa específica seca máxima que o solo natural. Esse é um resultado da reação de floculação. Segundo Sivapullaiah et al. (1998), após a adição da cal, as partículas do solo se agregam. Devido à floculação, a quantidade e o tamanho dos vazios do solo aumenta, reduzindo assim o $\rho_{dm\acute{a}x}$. Como o número e o tamanho dos vazios aumenta, é necessária mais água para preenchê-los, o que resultará no aumento da umidade ótima.

Eren e Filiz (2009) estabilizaram um solo argiloso com teores de 4, 6, 8 e 10% de cal dolomítica. Compactados na energia Proctor normal, o solo natural apresentou w_o de 15,0% e $\rho_{dm\acute{a}x}$ de 1,85g/cm³. Nas misturas solo-cal os resultados de w_o foram: 18,0%, 18,0%, 19,2% e 19,5%; e os resultados de $\rho_{dm\acute{a}x}$ obtidos foram: 1,69g/cm³, 1,67g/cm³, 1,65g/cm³ e 1,65g/cm³; com adição de 4, 6, 8 e 10% de cal, respectivamente.

Behak (2011) avaliou a estabilização de um solo A-7-6 com adição de 3 e 5% de cal dolomítica para a utilização como base de pavimentos. As misturas compactadas na energia Proctor modificada resultaram em valores de w_o de 15,5% e $\rho_{dm\acute{a}x}$ de 1,74g/cm³, com 3% de cal, e w_o de 16% e $\rho_{dm\acute{a}x}$ de 1,717g/cm³, com adição de 5% de cal.

2.4.2. RESISTÊNCIA

Os compostos produzidos pelas reações pozolânicas (CSH e/ou CAH) cimentam as partículas de solo vizinhas, formando blocos e diminuindo os vazios, o que gera um aumento na resistência da mistura em longo prazo. O ganho de resistência nas misturas é avaliado por meio de ensaios de compressão simples, compressão triaxial e Índice de Suporte Califórnia (CBR), e pode ser influenciado por alguns fatores, tais como: tipo de argilomineral do solo, tipo e teor de cal e pelas condições de cura (THOMPSON, 1975).

i) Efeito do tipo de argilomineral

As condições climáticas de uma região determinam o tipo de intemperismo sofrido pelo solo no seu processo de formação. Em decorrência desse processo, os tipos genéticos de solos encontrados em regiões tropicais apresentam propriedades e comportamentos distintos quando comparados aos solos não tropicais (NOGAMI & VILLIBOR, 1983). O tipo de argilomineral que constitui o solo é um dos fatores que irá determinar a sua reatividade com a cal e, consequentemente, o desempenho mecânico da mistura.

Ormsby e Kinter (1972), avaliando o comportamento de solos argilosos estabilizados com cal, constataram que solos que tinham a caulinita como argilomineral predominante reagiram melhor à estabilização com cal calcítica que solos que tinham a montimorilonita como argilomineral predominante. Entretanto, os solos ricos em montimorilonita apresentaram melhor desempenho quando estabilizados com cal dolomítica que os solos que continham caulinita como argilomineral predominante.

Bell (1996), estudando a estabilização de dois solos argilosos com cal dolomítica, observou que o solo contendo montimorilonita atingiu seu valor máximo de RCS com adição de 4% de cal, enquanto que o solo com predominância de caulinita, atingiu o valor máximo de RCS com teores entre 4 e 6% de cal.

Klinsky et al. (2014) estudaram a estabilização de dois solos (A-6 e A-7-5) com diferentes teores de cal CH-I (3, 5, e 7%) e constataram aumento nas propriedades de resistência após a adição de cal. Nesse estudo, o solo A-7-5 apresentou melhor desempenho que o solo A-6. Segundo os autores, o solo A-7-5 foi mais reativo à cal que o solo A-6 porque apresentou maiores ganhos relativos de resistência após a estabilização.

Como relatado em diversas pesquisas, o sucesso da estabilização depende da interação química entre os elementos do solo e da cal. No entanto, as classificações de solos mais usuais em pavimentação (TRB e SUCS) permitem entender indiretamente a composição mineralógica do solo pelas suas características físicas, porém não apontam o argilomineral predominante.

ii) Efeito do tipo e teor de cal

A cal é classificada de acordo com sua composição química em: a) calcítica: teor de óxido de cálcio (CaO) entre 100 e 90%, b) magnesiânica: entre 90 e 65% de CaO e c) dolomítica: entre 65 e 58% de CaO. Com relação ao processo de hidratação da cal, a norma ABNT NBR 7175 estabelece como requisitos: sua pureza, granulometria e algumas propriedades químicas e físicas, classificando as cales em CH-I, CH-II e CH-III. A cal CH-I é a mais pura, já a cal CH-III é uma cal de menor qualidade e pode conter impurezas.

De Carvalho (1979) avaliou o ganho de resistência de solos lateríticos estabilizados com cal calcítica. Para o solo natural, os resultados de RCS variaram de 80 a 1920 kPa. Para as misturas contendo de 3 a 6% de cal, a RCS após 28 dias de cura variou entre 210 e 5390 kPa, respectivamente.

Segundo Bhattacharja et al. (2003), independente da fonte de cálcio utilizada é necessário que uma quantidade equivalente de óxido de cálcio seja disponibilizada para as reações pozolânicas. Na cal dolomítica a presença de Mg reduz a disponibilidade de cálcio, o que pode ser compensado por um maior teor de cal aplicado na mistura.

Lovato (2004) estudou a estabilização de um solo argiloso (classe A-6) com uma cal calcítica e outra dolomítica e constatou que a RCS aumentou linearmente para os teores de 3, 4 e 5% de cal, porém as misturas com cal calcítica alcançaram maiores valores de resistência que as misturas com cal dolomítica.

Kolay et al. (2011) estudaram a estabilização com cal calcítica em diferentes teores (2, 4, 6 e 8%) de um solo com alto teor de matéria orgânica. Após 28 dias de cura, constataram aumentos de RCS com a adição de até 6% de cal ao solo. Já para 8% de cal, houve uma queda no valor de RCS da mistura, esse efeito foi atribuído à presença de matéria orgânica do solo que não reagiu com a cal, ocorrendo um excedente de cal na mistura, que atuou como material fino e inerte, e diminuiu a resistência da mistura.

iii) Efeito das condições de cura

Segundo Thompson (1970), o tempo e a temperatura são os principais fatores que influenciam na cura das misturas. Altas temperaturas de cura aceleram as reações de cimentação e produzem maiores incrementos de resistência. A cura dos corpos de prova de solo-cal é feita de modo que seja evitada a secagem da mistura, pois as reações de cimentação ocorrem na presença de água, e devem ser aplicadas em laboratório condições de cura que representem as condições de campo.

Thomé (1994) avaliou a estabilização de um solo contendo cerca de 70% de argila (classificado como A-7-5) com adição de 5, 7 e 9% de cal dolomítica para diferentes tempos de cura. Nesse estudo, observou-se que a RCS não apresentou variação significativa para tempos de cura superiores a 7 dias. De acordo com o autor, as reações pozolânicas podem ter sido interrompidas pela falta de água na mistura, pela baixa temperatura de cura, teor de cal insuficiente ou presença de matéria orgânica.

Gutierrez et al. (1998) estudaram a estabilização de um latossolo roxo (LG') com adição de cal dolomítica (2, 4 e 6%) e constataram que a RCS não aumentou com o tempo de cura, apresentando pequenas quedas para os teores de 2 e 4%. O autor atribuiu esse resultado à

natureza química da cal que não reagiu com o solo. Resultados semelhantes a esse foram observados por Silva (2016).

Osinubi (1998) analisou o comportamento de um solo laterítico estabilizado com 8% de cal dolomítica, compactado na energia Proctor normal, e observou que a cal aumentou a RCS do solo natural de 310kPa, para 875 e 1075kPa, com 7 e 14 dias de cura, respectivamente.

Santos e Pomatti (2000) estudaram a estabilização de um solo argiloso de comportamento não laterítico (NG'), contendo 25% de argila, com 7% de cal CH-III. Os autores constataram um contínuo aumento na RCS com o tempo de cura, sendo a maior variação observada até os 60 dias.

2.4.3. COMPORTAMENTO RESILIENTE

Ensaio triaxiais de cargas repetidas são realizados para avaliar a rigidez dos materiais constituintes do pavimento. Por meio desses ensaios obtêm-se o módulo de resiliência (MR) dos materiais, que é uma das propriedades usadas na verificação mecânica de pavimentos e uma ferramenta de apoio para o seu dimensionamento.

Svenson (1981) observou para um solo laterítico estabilizado com 3 e 5% de cal dolomítica que o módulo de resiliência não apresentou aumentos significativos com o tempo de cura. Nas amostras com 5% de cal e umidade de 2% acima do teor ótimo, o MR chegou a diminuir 11% dos 28 para os 90 dias de cura. O autor atribui esse resultado ao teor de umidade acima da umidade ótima de compactação e a natureza da cal que não reagiu com o solo.

Akoto (1986), estudando o comportamento resiliente de misturas solo-cal, observou que à medida que o número de repetições das cargas aumenta a amostra vai sendo compactada, ocorrendo a densificação. Isso resulta na redução da deformação resiliente e um decorrente aumento do módulo de resiliência.

Para Little (1999), se comparado com o solo no estado natural, as misturas solo-cal podem apresentar um aumento de mais de 1000% no valor do MR e uma redução na deformação de ruptura. Segundo o autor, misturas solo-cal são normalmente 10 a 25 vezes mais rígidas que solos não estabilizados.

Mohammad e Saadeh (2008) estudaram um solo estabilizado com 10% de cal e constataram aumentos no MR de 225 a 325% em relação ao solo natural. Ainda nesse estudo, os autores observaram uma maior influência da tensão confinante (σ_3) que da tensão desvio (σ_d) no

comportamento resiliente das misturas solo-cal, o que foi atribuído às mudanças texturais resultantes das reações de floculação e aglomeração, que levam a mistura a apresentar um comportamento resiliente semelhante a solos granulares.

2.4.4. MICROESTRUTURA

O principal objetivo da análise microestrutural é determinar os efeitos que a adição de cal provoca na matriz, na composição química e na composição mineralógica dos solos. As ligações que se desenvolvem entre as partículas de solo durante o processo de cura é resultado do desenvolvimento de novos compostos cimentantes produzidos pelas reações pozolânicas.

Segundo Bell (1996), o crescimento e o desenvolvimento desses novos compostos são acompanhados pelos aumentos de resistência e rigidez das misturas dos solos estabilizados. Vários estudos já foram realizados para avaliar as mudanças nas características microestruturais de solos estabilizados (WILLOUGHBY et al., 1968; LOCAT et al., 1996; GHOSH & SUBBARAO, 2001; ONITSUKA et al., 2001; CHAUNSALI & PEETHAMPARAN, 2010; SOLANKI & ZAMAN, 2012; VELASCO, 2013; TRAN et al., 2014).

Arabi e Wild (1986) estudaram as mudanças na microestrutura de um solo argiloso estabilizado com 10% de cal hidratada e curados a 75°C por 3, 6, 12 e 24 semanas. Observaram nas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) estruturas cobertas por uma camada de gel que, segundo os autores, indicam a fase inicial da formação de silicatos hidratados de cálcio (CSH). Nos resultados de difratometria de raio X (DRX), foram notados novos picos cristalinos nas misturas solo-cal, que correspondem à formação desse gel de CSH.

Choquette et al. (1987) analisaram as mudanças na microestrutura de quatro solos argilosos com adição de 4% de cal hidratada, curados em diferentes períodos (de 1 a 300 dias) a uma temperatura de 20°C. Nos primeiros dias de cura (até 100 dias), os autores observaram mudanças texturais nas matrizes dos solos estabilizados, como formação de blocos. A presença de novos compostos cimentantes foi observada nas amostras curadas por períodos mais longos (300 dias). Com a utilização da técnica de DRX, os autores constataram uma diminuição gradativa dos picos referentes aos argilominerais.

Eisazadeh et al. (2011) avaliaram as mudanças na microestrutura de um solo argiloso laterítico (LG') estabilizado com 3 e 7% de cal hidratada, curados à temperatura de 27°C

durante 1, 4 e 8 meses. Nas análises de DRX, foram observadas diminuições dos picos referentes à caulinita após a adição de cal. Segundo os autores, essa redução foi causada pelas reações que a cal provocou na estrutura do mineral. Além disso, foram observados novos picos nas amostras de solo estabilizado, evidenciando a formação de novos compostos cristalinos. Com o uso da espectrometria de energia dispersiva (EDS) também foi possível determinar se as reações de cimentação ocorreram. Segundo os autores, a diminuição da taxa de Ca/Si com o tempo de cura é um indicador da formação de novos compostos cimentantes. No entanto, nos resultados dessa pesquisa a taxa Ca/Si não diminuiu com relação ao tempo de cura, os autores explicam que o fato da taxa de Ca/Si não diminuir com o tempo de cura indica que a composição química do solo não variou significativamente com a adição de cal.

Muhmed e Wanatowski (2013) analisaram as mudanças na microestrutura de um solo argiloso (rico em caulinita) estabilizado com 5% de cal hidratada curados a 20°C por 7, 14 e 28 dias. As imagens de MEV dos primeiros dias de cura (7 dias) mostraram as mudanças na matriz do solo, que passou a ter uma aparência mais floculada. Para tempos de curas maiores (28 dias) foi constatada a presença de compostos cimentantes resultantes das reações pozolânicas.

Com esses estudos, mostrou-se a importância da análise microestrutural dos materiais estabilizados. Ainda que a avaliação de propriedades de interesse da engenharia seja preponderante, as respostas para o êxito ou fracasso da estabilização parecem estar na interação química entre os componentes do solo e da cal.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o programa experimental desenvolvido a fim de alcançar o objetivo de: avaliar a aplicação dos métodos de dosagem de cal mais usados na pavimentação para estabilização de um solo de comportamento laterítico e um não laterítico. Os materiais e os métodos empregados foram selecionados de forma a alcançar cada objetivo específico:

- I. *Empregar os métodos de dosagem de Eades e Grim (1966) e de Thompson (1970) na determinação do teor de cal para a estabilização de solos:*

Os métodos de dosagem empregados foram escolhidos por serem bastante aplicados no Brasil (LOVATO, 2004; DELGADO, 2007; CORRÊA, 2008; ARAÚJO, 2009). Cada método apresenta um critério de dosagem específico e algumas limitações, dessa forma, foi possível avaliar a aplicabilidade desses métodos aos materiais estudados.

- II. *Estudar o comportamento de dois solos de características geotécnicas diferentes quando estabilizados com cal:*

Para essa pesquisa foram selecionados dois solos, um de comportamento laterítico e um de comportamento não laterítico. Com isso, buscou-se compreender os fatores de interação solo-cal no que diz respeito às particularidades de composição de cada material.

- III. *Entender o efeito de diferentes tipos de cales na estabilização de solos:*

Foram selecionadas duas cales de diferentes concentrações de CaO para avaliar a influência do tipo de cal no desempenho mecânico das misturas e se faz necessária à utilização de uma cal mais pura e de melhor qualidade para estabilização de solos.

- IV. *Avaliar propriedades de interesse da engenharia em diferentes tempos de cura:*

A fim de avaliar a influência da cura na estabilização com cal, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e de módulo de resiliência (MR) nas misturas em diferentes tempos de cura.

- V. *Observar as mudanças que a adição de cal provoca na microestrutura dos solos.*

Com a utilização das técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e difração de raios X (DRX) foi possível observar as mudanças na microestrutura do solo e qualificar a alteração da composição química dos materiais quando estabilizados com cal

3.1. SOLOS

3.1.1. SELEÇÃO, COLETA E PREPARAÇÃO

Foram selecionados dois solos da região do interior do Estado de São Paulo, da base de dados de Takeda (2006). Os solos foram coletados no km 8 da Rodovia SP 207, nas proximidades do município de São Sebastião da Gramma. A seleção foi feita com base nas características geotécnicas de cada material e na viabilidade de aplicação da cal como agente estabilizante desses solos.

O talude de corte de onde foram coletados os materiais (Figura 2(a)) apresentava uma linha de seixos (LS). Após os ensaios de caracterização e classificação desses solos, foi confirmado que, acima da LS, constituía-se de um solo argiloso de comportamento laterítico (LG') (Figura 2(b)) e, abaixo da LS, um solo argiloso de comportamento não laterítico (NG') (Figura 2(c)).

a)

b)

c)

Figura 2 - Talude de corte de onde foram coletados os solos

Os solos foram coletados e levados para o Laboratório de Infraestrutura de Transportes - EESC/USP, onde foram passados na peneira de 4,8mm, secos ao ar até próximo da umidade higroscópica, homogeneizados, quarteados, ensacados e armazenados de modo a evitar variações de umidade até a execução dos ensaios.

3.1.2. CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

Os ensaios laboratoriais realizados para a caracterização física desses solos são apresentados na Tabela 1. A análise granulométrica conjunta, os limites de liquidez e plasticidade e a massa específica dos solos fornecem parâmetros de base para os sistemas de classificação TRB (*Transportation Research Board*) e SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos).

Para a determinação do comportamento laterítico ou não laterítico dos solos foram realizados os ensaios de mini-MCV e de perda de massa por imersão. Esses procedimentos são usados na classificação de solos tropicais empregados na construção de pavimentos com base na metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical).

Tabela 1 - Ensaios realizados para a caracterização e classificação dos solos

Ensaio	Norma
Preparação de amostras	ABNT NBR 6457
Análise granulométrica conjunta	ABNT NBR 7181
Limite de liquidez	ABNT NBR 6459
Limite de plasticidade	ABNT NBR 7180
Massa específica dos solos	ABNT NBR 6508
Metodologia MCT	DER/SP M196-89
Compactação Proctor	DER/SP M13-71
Índice de Suporte Califórnia (CBR)	DER/SP M53-71

As curvas granulométricas dos dois solos são mostradas na Figura 3, onde se observa que são materiais que apresentam na sua composição grandes quantidades de partículas finas (silte e argila). Como dito por Little (1995), esse tipo de material reage melhor que solos granulares à estabilização com cal, pois quanto maior a superfície específica, mais intensas são as reações entre o solo e a cal. Observa-se ainda na Figura 3 uma descontinuidade na curva granulométrica dos solos, essa descontinuidade é devido ao uso do defloculante no ensaio de sedimentação que desagrega as partículas de solo.

Figura 3 - Curvas granulométricas dos solos

A Tabela 2 mostra um resumo da caracterização física, com a quantidade de partículas constituintes das frações granulométricas de cada solo e o resultado dos ensaios de limite de liquidez e plasticidade, e massa específica dos sólidos.

Tabela 2 - Caracterização física dos solos

Solo	% passa #200	Areia [%]	Silte [%]	Argila [%]	LL [%]	LP [%]	IP [%]	ρ_s [g/cm ³]
Acima da LS	75	25	30	45	62	38	24	2,785
Abaixo da LS	78	22	48	30	53	37	16	2,909

Observa-se que os dois materiais são de alta plasticidade, porém, o solo coletado acima da LS apresenta um índice de plasticidade maior, o que pode ser influenciado pela maior quantidade de argila presente na sua composição ou pela natureza dos minerais que o constituem. Os resultados de ρ_s confirmam que há uma diferença na composição mineralógica dos dois materiais. Enquanto que o solo acima da LS apresentou um valor de um solo predominantemente composto por caulinita (ρ_s entre 2,50 e 2,76g/cm³) o solo abaixo da LS pode apresentar outros minerais na sua composição, o que é característicos de solo de comportamento não-lateríticos (NOGAMI E VILLIBOR, 1995).

Segundo os sistemas de classificação TRB e USCS, os solos utilizados nessa pesquisa foram classificados como argilosos e siltosos, respectivamente. Esses solos têm como características geotécnicas: alta plasticidade, má trabalhabilidade, alta expansão, baixa resistência e baixo desempenho quando usados como subleito.

Com a realização dos ensaios de mini-MCV e perda de massa por imersão foi comprovado que o solo coletado acima da LS se tratava de um solo de comportamento laterítico e o solo coletado abaixo da LS, um solo de comportamento não laterítico. Os valores dos coeficientes c' , d' , e' e da perda de massa por imersão (P_i) são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Coeficientes da classificação MCT

Solo	c'	d'	P_i [%]	e'
Acima da LS	1,85	44,7	80	1,08
Abaixo da LS	1,60	20,2	270	1,55

A Figura 4 mostra a representação gráfica da MCT, onde foram classificados os solos utilizados nessa pesquisa. Desse ponto em diante, o solo coletado acima da LS é referenciado como LG' e o solo coletado abaixo da LS referenciado como NG', de acordo com a sua classificação MCT.

Figura 4 - Classificação MCT

Um resumo da classificação dos materiais é apresentado na Tabela 4. Visto que nos sistemas de classificação TRB e USCS os dois materiais foram enquadrados na mesma classe, fica evidente a importância da utilização da metodologia MCT na classificação de solos, pois essa leva em consideração aspectos de formação pedológica dos materiais.

Tabela 4 - Classificação dos solos estudados

Solo	TRB	USCS	MCT
Acima da LS	A-7-5	MH	LG'
Abaixo da LS	A-7-5	MH	NG'

3.1.3. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação Proctor (DER/SP M 13-71) foi executado na energia normal com o objetivo de determinar os parâmetros de compactação: umidade ótima (w_o) e massa específica seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) dos solos. O solo LG' apresentou w_o de 26,3% e $\rho_{dm\acute{a}x}$ de 1,479g/cm³, já o solo NG' apresentou w_o de 21,9% e $\rho_{dm\acute{a}x}$ de 1,591g/cm³. As curvas de compactação e saturação 100% são apresentadas na Figura 5.

Figura 5 - Curvas de compactação e saturação 100%

De posse dos parâmetros obtidos no ensaio de compactação, foi realizado o ensaio de CBR, com base na norma DER/SP M53-71, no ponto referente à umidade ótima. Como resultados desse ensaio, o solo LG' apresentou um CBR de 17% e uma expansão de 0,28%, enquanto o solo NG', um CBR de 6% e 3,14% de expansão.

De acordo com as normas brasileiras de projeto, para a utilização como subleito de pavimentos, os materiais devem apresentar uma expansão menor ou igual a 2% e um valor de $\text{CBR} \geq 2\%$ (DNIT, 2006). Visto isso, o solo LG' pode ser empregado tanto como subleito ou reforço de subleito. O solo NG' sem nenhum tipo de tratamento não poderia ser empregado em nenhuma das camadas de pavimentos, porém pode ser utilizado em corpo de aterro como parte integrante da plataforma da rodovia (DNIT, 2009).

3.2. CAL

Nessa pesquisa foram utilizadas duas cales que atendem aos requisitos da norma ABNT 7175 – Cal Hidratada Para Argamassas. A primeira, selecionada por ser amplamente comercializada na região de São Carlos-SP, foi a Cal Hidratada Itaú; uma cal dolomítica do tipo CH-III. A segunda, uma cal hidratada dolomítica do tipo CH-I, foi doada pela Pedreira do Grupo Bandeirantes de São Carlos – SP. Essa cal é utilizada na composição das misturas asfálticas para aplicação nas rodovias da região.

A Tabela 5 mostra a concentração de óxidos de cálcio presente em cada cal. Esses dados são encontrados na ficha técnica fornecida pelos fabricantes. Observa-se que a cal CH-I possui uma concentração de óxidos de cálcio maior que a CH-III, o que indica um maior potencial para a ocorrência de reações pozolânicas quando usadas na estabilização de solos.

Tabela 5 - Concentração de CaO das cales utilizadas (VOTORANTIM,2016; Mineração São Judas/Anexo A)

Cal	Concentração CaO (%)
CH-I	40
CH-III	< 15

A análise da composição química das duas cales foi realizada com o uso da técnica de espectrometria de energia dispersiva (EDS), os elementos presentes na porção estudada de cada material são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição química das cales (EDS)

Elemento	Concentração (%)	
	CH – I	CH – III
Mg	20,8	23,7
Al	0,2	-
Si	0,8	-
Ca	45,4	43,4
O	32,9	32,9
Total	100,0	100,0

Como esperado, os dois materiais são compostos basicamente de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e oxigênio (O). A cal CH-I ainda apresenta traços de silício (Si) e alumínio (Al), derivados respectivamente da Sílica (SiO_2) e do óxido de alumínio (Al_2O_3) que podem estar presentes nesses materiais em pequenas quantidades.

3.3. MÉTODOS

3.3.1. DOSAGEM DO TEOR DE CAL

Foram empregados dois métodos de dosagem de solo-cal. Esses métodos foram selecionados por serem métodos bastante utilizados em projetos de estabilização e por usarem procedimentos de ensaios e critérios distintos para determinar o teor de cal a ser adicionado ao solo.

- O método de Eades e Grim (1966), descrito na ASTM D 6272-99, usa parâmetros químicos para indicar o teor de cal da mistura, e;
- O método de Thompson (1970) usa parâmetros físicos e mecânicos para definir o teor de cal para a estabilização.

3.3.2. COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIOS MECÂNICOS

Após determinar as porcentagens de cal a serem adicionadas ao solo, foram executados ensaios de compactação Proctor na energia normal para obter os parâmetros: umidade ótima (w_o) e massa específica seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) das misturas solo-cal. Como o foco dessa pesquisa é avaliar os parâmetros de interação solo-cal no processo de estabilização, foi adotada a energia normal. Esse ensaio ainda permitiu a comparação da mudança de

comportamento das curvas de compactação dos solos após a adição de diferentes porcentagens de cal.

Conhecidos os valores da w_o e da $\rho_{dm\acute{a}x}$, foram moldados corpos de prova (CP) para a realização dos ensaios mecânicos. A massa de cal foi misturada ao solo na umidade higroscópica e em seguida adicionou-se água suficiente para atingir a umidade ótima da mistura.

Os CP's foram moldados na w_o e $\rho_{dm\acute{a}x}$, com uma tolerância da variação de umidade de $\pm 0,5\%$, e controle do grau de compactação (GC) entre 99% e 101%. A compactação foi realizada de maneira estática em uma prensa hidráulica e o número de camadas determinado pelas dimensões dos CP's utilizados em cada ensaio (Tabela 7).

Tabela 7 - Dimensões dos corpos de prova

Ensaio	Dimensões [cm] x [cm]	Número de camadas
Resistência à Compressão Simples	5 x 10	3
Módulo de Resiliência	10 x 20	5

Os corpos de prova compactados foram embalados em filme plástico, etiquetados e armazenados em condições controladas de temperatura por períodos determinados. Para os ensaios mecânicos, foram adotados 4 períodos de cura: 0, 2, 7 e 14 dias a uma temperatura controlada de 50°C em estufa. A temperatura de cura adotada foi proposta por Thompson (1970) para avaliar a reatividade do solo com a cal após 2 dias de cura. Os períodos de 7 e 14 dias foram adotados para avaliar o desenvolvimento das reações de cimentação com o tempo e a influência da cura na resistência e rigidez das misturas.

Para quantificar o efeito da cimentação nas misturas, foram avaliadas duas condições nos ensaios de RCS: sem imersão e após imersão (por um período de 4 horas antes da realização do ensaio). Esse tempo de imersão foi adotado conforme experiências de pesquisas realizadas no Laboratório de Infraestrutura de Transportes da EESC/USP (SILVA JR., 2010; KLINSKY, 2013). A quantidade de corpos de prova ensaiados para cada condição experimental é apresentada na Tabela 8, portanto para cada composição de mistura foram moldados 28 CP's.

Tabela 8 - Quantidade de corpos de prova compactados para uma mistura

Cura [dias]	Ensaio		MR
	RCS		
	Imerso	Não imerso	
0	3	3	1
2	3	3	1
7	3	3	1
14	3	3	1
Total	28		

Para a determinação da RCS, optou-se por ensaiar três CP's para cada condição avaliada, pois essa quantidade admite um nível de confiabilidade de 95% (GRUBBS, 1969). Para o MR, devido à grande quantidade de material necessário para moldagem do CP, o que acarretou em dificuldade de coleta, preparação e armazenamento de material, foi ensaiado um corpo de prova para cada condição. Segundo Parreira *et al.* (1998), os ensaios triaxiais cíclicos apresentam boa repetibilidade tanto para ensaios realizados no mesmo CP quanto em CP's diferentes.

3.3.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

Os ensaios de resistência à compressão simples foram executados sob deformação controlada a uma velocidade de 1,27 mm/min, em uma prensa com capacidade de aplicação de carga de 50 kN. Um programa de computador fez aquisição dos pares de tensão e deformação durante a execução do ensaio, que foram exportados para uma tabela, de onde foi possível obter a força máxima de compressão e a curva tensão *versus* deformação de cada corpo de prova.

Conhecidos os valores da força máxima de compressão e as dimensões de cada corpo de prova, a RCS foi calculada pela Equação 1 a seguir:

$$RCS = \frac{4.F}{g.\pi.D^2} \quad (1)$$

Onde:

RCS: Resistência à Compressão Simples [MPa];

F: Força máxima de compressão [N];

g: Aceleração da gravidade adotada de 9,81m/s²;

D: Diâmetro do corpo de prova [cm].

A partir da curva tensão *versus* deformação resultante do ensaio de RCS, foi calculado o módulo tangente inicial (E_0) de cada amostra. Para isso, foi adotado o procedimento proposto por Duncan e Chang (1970), que admite a curva tensão *versus* deformação como uma hipérbole, descrita pela Equação 2.

$$\frac{\varepsilon_a}{\sigma_a} = a + b \cdot \varepsilon_a \quad (2)$$

Onde,

ε_a : é a deformação axial;

σ_a : a tensão axial;

a e b: são as constantes da reta que melhor se ajusta aos resultados dos ensaios de RCS.

Sendo assim, o módulo tangente inicial (E_0) foi calculado pela Equação 3.

$$E_0 = \frac{1}{a} \quad (3)$$

O teste de Grubbs (1969) foi aplicado na análise estatística dos resultados desses ensaios, para a identificação de valores *outliers* das observações amostrais. Nesse teste, são usados os valores da média aritmética e do desvio padrão de cada grupo de amostras na determinação de um valor estatístico (G), calculado pela Equação 4 a seguir.

$$G = \max \left(\frac{Y_i - \bar{Y}}{s} \right) \quad (4)$$

Onde, para cada conjunto de amostras:

Y_i : é uma observação da amostra;

$\bar{Y}$: é a média amostral;

s: desvio padrão amostral.

Para decidir se uma observação é considerada *outlier*, o valor estatístico G é comparado com um valor crítico G_c , que depende do nível de confiança e do número de observações da amostra. Para este trabalho adotou-se $G_c = 1,15$, pois foram feitas 3 observações e o nível de confiança é de 95%. Se $G > G_c$ o resultado é considerado *outlier* e por isso, é descartado.

3.3.4. MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

O ensaio de módulo de resiliência foi realizado segundo a norma AASHTO T 307-99 *Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. Essa norma determina 1.000 aplicações de um par de tensões (desvio e confinante) para o condicionamento do corpo de prova, seguidas pela aplicação de 15 pares de tensões que são efetivamente considerados como resultado do ensaio.

A fase de condicionamento se dá pela necessidade de eliminar a influência das deformações permanentes ocorridas durante as primeiras aplicações de carga. Na Tabela 9 são mostrados os pares de tensões recomendados para realização do ensaio para a determinação do módulo de resiliência.

Os ensaios foram executados em um equipamento triaxial de cargas repetidas dotado de uma célula de carga com capacidade de 10 kN. Dois LVDT's (*Linear Variable Differential Transducers*) foram posicionados no terço médio dos corpos de prova, com o objetivo de medir os deslocamentos sofridos pelo corpo de prova durante o ensaio.

Tabela 9 - Pares de tensões aplicados no ensaio de MR

Sequência	σ_3 [kPa]	σ_d [kPa]	Número de aplicações	Sequência	σ_3 [kPa]	σ_d [kPa]	Número de aplicações
0	103,4	93,1	1000	8	68,9	124,1	100
1	20,7	78,6	100	9	68,9	186,1	100
2	20,7	37,3	100	10	103,4	62,0	100
3	20,7	55,9	100	11	103,4	93,1	100
4	34,5	31,0	100	12	103,4	196,1	100
5	34,5	62,0	100	13	137,9	93,1	100
6	34,5	93,1	100	14	137,9	124,1	100
7	68,9	62,0	100	15	137,9	248,2	100

Durante a realização do ensaio, um programa computacional, desenvolvido na plataforma LabView, efetuou a aquisição dos dados referentes à carga cíclica aplicada e aos deslocamentos nos LVDT's. Em seguida, por meio de regressão estatística, o programa ajustou os dados a quatro modelos matemáticos que representam o MR (Tabela 10). O modelo com maior coeficiente de determinação (R^2) foi selecionado como o modelo que melhor representou o MR dos corpos de prova.

Tabela 10 - Modelos matemáticos para cálculo do MR

Modelo	Equação
Modelo em função da tensão desvio	$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$
Modelo em função da tensão confinante	$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$
Modelo composto	$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$
Modelo universal – AASHTO	$MR = k_1 \cdot p_a \cdot \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$

Onde: k_i = constantes de regressão múltipla; σ_d = tensão desvio; σ_3 = tensão confinante;
 p_a = pressão atmosférica; θ = somas das três tensões principais e τ_{oct} = tensão octaédrica cisalhante.

Após a seleção do modelo matemático que melhor representou o comportamento resiliente dos corpos de prova e a fim de avaliar a variação do MR para diferentes teores de cal e em diferentes períodos de cura, foram adotados dois procedimentos para o cálculo de valores fixos de MR. Os procedimentos de cálculo são descritos a seguir:

- i) Cálculo por tensões definidas: Os valores de MR foram calculados por tensões definidas em pesquisas anteriores. De acordo com os trabalhos de Little (2000), Solanki *et al.* (2010) e Klinsky *et al.* (2014), foi adotado como representativo das tensões atuantes em um subleito de rodovia o par de tensões: $\sigma_d = 41,3\text{kPa}$ e $\sigma_3 = 13,8\text{kPa}$.
- ii) Cálculo por tensões do pavimento hipotético: Com a utilização do programa computacional ELSYM 5[®], foi calculado o valor de MR e as tensões atuantes no centro da camada de sub-base de um pavimento hipotético. A estrutura do pavimento e as características dos materiais são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Estrutura do pavimento hipotético

Camada	Espessura [cm]	Coefficiente de Poisson [v]	Módulo de resiliência [MPa]
Tratamento Superficial	2,5	0,30	1500
Base	15,0	0,35	700
Sub-base	15,0	0,35	Variável
Subleito	Semi-infinito	0,40	45

Essa estrutura representa uma rodovia de baixo volume de tráfego, submetida a solicitações do eixo padrão de 8,2 tf, distância entre rodas de 30 cm e pressão de enchimento dos pneus de 80 psi. As espessuras das camadas, o coeficiente de Poisson (ν) e o módulo de resiliência

(MR) dos materiais foram baseados nos indicados pela instrução de projeto IP-DE-P00-001 do DER de São Paulo.

3.3.5. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV), ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS) E DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

Para observar os efeitos da adição de cal ao solo em nível microscópico, foram realizados ensaios de MEV dos materiais e das misturas. Nesse ensaio, são produzidas imagens de alta resolução da superfície das amostras através de um feixe de elétrons. Devido à aparência tridimensional característica das imagens de MEV é possível observar variações texturais, formação e evolução de compostos cimentantes decorrentes das reações da cal no solo, entre outros.

A técnica de EDS foi usada para a caracterização química das amostras. Nesse ensaio são analisados os raios X emitidos pela amostra em resposta à incidência de um feixe de elétrons sobre o material. Como cada elemento químico possui uma determinada energia, é possível determinar quais elementos estão presentes naquele local. O ensaio de EDS foi realizado nas mesmas amostras utilizadas para a obtenção das imagens de MEV.

Nesses ensaios foram utilizadas amostras retiradas de corpos de prova moldados apenas para essa finalidade. Após atingir o tempo de cura necessário, uma amostra era retirada do corpo de prova, seca em estufa e depois embalada em um saco hermético (para evitar o ganho de umidade).

Os ensaios foram realizados no Departamento de Engenharia de Materiais da EESC/USP, com a utilização do equipamento FEI Inspect F-50. As amostras foram recobertas com uma camada de carbono (processo de evaporação) para a obtenção das imagens e caracterização química, o equipamento utilizado para o recobrimento foi o Quorum Q150R ES.

A técnica de difração de raios X (DRX) foi empregada em amostras de solo natural e de misturas solo-cal para a identificação qualitativa dos argilominerais do solo e das fases cristalinas formadas após a adição de cal. O ensaio consiste na incidência de um feixe monocromático de raios X sobre a amostra estudada. Esse feixe de raios paralelos de comprimento (λ) atinge o plano cristalino com distância interplanar (d), e após sofrer difração, forma um ângulo θ com o plano. Analisando os padrões de difração de raios X foi possível identificar os argilominerais e outros compostos cristalinos presentes nos materiais ensaiados.

Os ensaios de DRX foram realizados no Laboratório de Difração de Raios – X do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo IFSC/USP. Nesses ensaios foi utilizado o difratômetro Rigaku Rotaflux, modelo RU200B. As amostras foram passadas na peneira de abertura 0,074mm e ensaiadas na condição orientada natural, o campo de varredura adotado foi de 3° a 50°, velocidade de 1°/minuto e ânodo de cobre.

Os ensaios para análises microestruturais empregadas nesse trabalho possuem particularidades e limitações. Como foi usada uma pequena amostra para a análise, deve-se salientar que problemas como a heterogeneidade dos corpos de prova e a representatividade da amostra podem interferir nesses ensaios. Entretanto, as três técnicas aplicadas em conjunto, podem fornecer evidências significativas da formação de novos produtos decorrentes das reações solo-cal.

4. RESULTADOS DOS MÉTODOS DE DOSAGEM

Como visto nos capítulos anteriores, os métodos de dosagem aplicados nesta pesquisa foram desenvolvidos em países de clima temperado, portanto, podem existir limitações quanto à aplicação desses métodos em solos de regiões que tiveram uma formação pedológica diferente, o que pode influenciar diretamente na determinação do teor de cal para a estabilização.

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos métodos de dosagem de Eades e Grim (1966) e de Thompson (1970) aplicados no programa experimental. São apresentados e analisados os procedimentos de ensaios, os materiais utilizados em cada etapa e definidos os teores de cal adotados para a fase de ensaios mecânicos

4.1. DOSAGEM DO TEOR DE CAL

4.1.1. MÉTODO DE EADES E GRIM (1966)

O método proposto por Eades e Grim (1966), ou método do pH, foi realizado de acordo com a norma ASTM D 6272 – 99. Nesse ensaio utilizou-se um medidor de pH portátil da marca KASVI, Figura 5 (b), modelo K39-0014PA, com resolução de pH de 0,1 e temperatura de 0,1°C. Apesar desse equipamento possuir compensação automática de temperatura, tomou-se cuidado para que a sala estivesse a aproximadamente 25°C, temperatura de calibração do equipamento.

Primeiramente, foi determinado o pH de cada solo no estado natural e em seguida o pH das misturas solo-cal preparadas nas proporções indicadas pelo método, de 2% a 6% de cal (Figura 5 (a)). O resultado do pH das misturas é apresentado na Tabela 12 e o valor em destaque é o teor de cal necessário para a estabilização dos solos estudados de acordo com o método de Eades e Grim (1966).

Figura 6 - Misturas de solo-cal utilizadas no método do pH (a) e medidor de pH (b)

Tabela 12 - pH das misturas solo-cal

Mistura		Teor de cal						
		0%	2%	3%	4%	5%	6%	7%
LG'	CH-I	7,9	11,0	11,5	11,9	12,1	12,3	12,4
	CH-III	7,9	12,2	12,4	12,6	12,7	12,8	-
NG'	CH-I	6,9	11,6	12,0	12,2	12,4	12,5	-
	CH-III	6,9	12,3	12,4	12,5	12,6	12,6	-

Como mostrado na Tabela 12, para a estabilização do solo LG' foi necessário 7% de cal CH-I e 3% de cal CH-III. Para a estabilização do solo NG' foi necessário 5% de cal CH-I e 3% de cal CH-III. A Figura 7 mostra a tendência de aumento do pH dos solos com a adição de cal. As misturas com cal CH-I necessitaram de maiores teores de cal para atingir o pH de 12,4 que as misturas com cal CH-III. No entanto, como a cal do tipo CH-I contém maior concentração de CaO era esperado que o método apontasse teores menores para esse tipo de cal. Esse método é fundamentado somente na estabilização do pH, portanto, não garante que essas porcentagens de cal quando incorporadas ao solo resultem em misturas com desempenho mecânico satisfatório para uso em pavimentos.

Figura 7 - Dosagem método do pH

Como foi dito anteriormente, alguns componentes do solo como sulfatos, fosfatos, quantidade de matéria orgânica e o tipo de argilomineral podem afetar negativamente as reações solo-cal e produzir resultados errados usando este método (EADES & GRIM, 1996). Dadas as limitações do método do pH quando aplicado a solos de regiões tropicais, outras conclusões a respeito do desempenho dessas misturas só foram possíveis após a realização dos ensaios mecânicos.

4.1.2. MÉTODO DE THOMPSON (1970)

A primeira etapa desse método de dosagem consiste em avaliar o ganho de resistência à compressão simples (RCS) do solo após a adição de cal. Nessa etapa, como recomendação do método, foi adotado o teor de 5% de cal para ser incorporado ao solo.

O ensaio de compactação Proctor foi realizado na energia normal para misturas de solo + 5% de cal. As curvas de compactação são apresentadas nas Figuras 8 e 9, e mostram uma tendência de aumento na w_0 , como já foi constatado em estudos anteriores, isso ocorre porque as misturas necessitam de mais água para saturar a maior quantidade de vazios dos solos estabilizados com cal e alcançar a umidade ótima (SIVAPULLAIAH ET AL., 1998).

Figura 8 - Curvas de compactação solo LG'

Figura 9 - Curvas de compactação solo NG'

Com a intensificação do contato entre os grãos do solo promovido pelas reações de trocas catiônicas, floculação e aglomeração, que acontecem imediatamente após a adição de cal, as misturas passam a exigir maior energia de compactação, o que causa diminuição no valor da $\rho_{d\text{máx}}$ (TRB, 1987). Os parâmetros de compactação das misturas são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros de compactação usados no método de dosagem de Thompson

Mistura	w_0 [%]	$\rho_{d\text{máx}}$ [g/cm^3]	Mistura	w_0 [%]	$\rho_{d\text{máx}}$ [g/cm^3]
LG'	26,3	1,479	NG'	21,9	1,591
LG' + 5% CH-I	28,0	1,433	NG' + 5% CH-I	29,2	1,402
LG' + 5% CH-III	27,7	1,406	NG' + 5% CH-III	28,1	1,405

No solo LG', a w_0 aumentou 6,5% após a adição de cal CH-I e 5,3% com adição de cal CH-III. Para o solo NG', a w_0 aumentou 33,3% com adição de cal CH-I e 28,3% com cal CH-III. Para o solo LG', o valor da ρ_{dmax} diminuiu 3% com adição de cal CH-I e 5% com cal CH-III, já para o solo NG' a ρ_{dmax} diminuiu 12% com adição de cal CH-I e 11,5% com cal CH-III. Observa-se que a variação nas propriedades de compactação foi menos intensa para o solo de comportamento laterítico (LG') que para o solo de comportamento não laterítico (NG') com a adição do mesmo teor e tipo de cal.

Para análise das duas condições de cura propostas por Thompson (1970) foi realizado um ensaio comparativo da RCS de misturas com 5% de cal curadas em câmara úmida (25°C durante 7 e 28 dias) e em estufa (50°C durante 2 e 7 dias). Os resultados são apresentados nas Figuras 10 e 11, para o solo LG' e NG', respectivamente.

Figura 10 – Mistura LG'+5% curados a 25°C e 50°C

Figura 11 - Mistura NG'+5% curados a 25°C e 50°C

Observa-se das Figuras 10 e 11 que os corpos de prova curados por 28 dias à 25°C apresentaram uma pequena diferença no valor de RCS quando comparados aos corpos de prova curados por 7 dias à 50°C. Esses resultados reafirmam que essas são condições equivalentes de cura, portanto para acelerar o processo de cura foi adotada a temperatura de 50°C.

Os corpos de prova de solo natural foram compactados e ensaiados imediatamente, enquanto os de solo-cal foram compactados, embalados (para evitar perda de umidade) e curados por 2 dias na temperatura de 50°C, antes de serem ensaiados. Na Figura 12 são apresentados os resultados dos ensaios de RCS para cada mistura.

Figura 12 - RCS - Método de dosagem Thompson

Da Figura 12, pode-se observar que nenhuma das misturas de solo estabilizado com cal apresentou um aumento de RCS maior que 345 kPa em relação ao solo natural. Segundo Thompson (1970), esses solos são classificados como solos não reativos à cal e por isso, o aumento do teor de cal não provocará aumentos significativos na resistência à compressão simples desses materiais.

As misturas de solo-cal apresentaram valores de RCS menores que o solo natural, exceto a mistura LG' + 5%CH-I, que mostrou um aumento de resistência de 118kPa, equivalente a 31% em relação ao solo natural. Observa-se também que as misturas com cal CH-I apresentaram maiores valores de RCS após a cura, isso pode ser atribuído ao maior teor de

óxido de cálcio presente nesse tipo de cal que possibilita maior ocorrência das reações de cimentação.

Por serem classificados como solos não reativos, para a segunda etapa do método, foi avaliado o efeito de diferentes teores de cal no índice de plasticidade dos solos. Os ensaios de limite de plasticidade e limite de liquidez das misturas solo-cal foram realizados 1 hora após o solo ter sido misturado à cal. Os resultados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - IP dos solos melhorados com cal

Teor de cal	LG' (IP)		NG' (IP)	
	CH-I	CH-III	CH-I	CH-III
0%	24		16	
2%	13	11	NP	NP
4%	NP	NP	-	-
6%	-	-	-	-

As misturas de solo NG' + 2% de cal apresentaram comportamento não plástico para ambas as cales. Portanto, segundo esse método, o teor de cal para este solo é 2%. Para o solo LG', com adição de 2% de cal CH-I houve uma redução do índice de plasticidade de 46% em relação ao solo natural, já quando o solo foi misturado à cal CH-III essa redução foi de 55%. Com 4% de cal as misturas com solo LG' não apresentaram limite de plasticidade. A Tabela 15 apresenta uma síntese dos teores de cal obtidos pelos métodos de dosagem aplicados preliminarmente nessa pesquisa.

Tabela 15 - Teores de cal para estabilização

Solo		Método de dosagem	
		pH	Thompson
LG'	CH-I	7%	4%
	CH-III	3%	4%
NG'	CH-I	5%	2%
	CH-III	3%	2%

Nota-se da Tabela 15, que os teores de cal não convergiram para a mesma porcentagem, isso se deve ao fato de que os dois métodos selecionados usam procedimentos e critérios distintos para a dosagem. Durante a realização dos ensaios, foram observadas inadequações e inconsistências nos métodos de dosagem de cal quando aplicados aos solos utilizados nessa

pesquisa. Como os resultados de RCS das misturas com 5% de cal apresentaram valores baixos e, na maioria dos casos, inferiores à RCS do solo natural, para a etapa de ensaios mecânicos foram adotados os teores de 5%, 7,5% e 10% de cal para serem incorporados ao solo. Desse modo foi possível avaliar se a dosagem com teores maiores de cal seria mais eficiente na estabilização desses solos.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples (RCS), módulo de resiliência (MR), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e difração de raios X (DRX) são apresentados e discutidos nesse capítulo. Os dois solos estudados nessa pesquisa foram estabilizados com dois tipos de cal e empregados três teores, no total foram avaliadas 12 misturas. As composições de misturas são mostradas na Tabela 16.

Tabela 16 - Composição das misturas solo-cal

Solo	Cal	Teor de cal [%]		
LG'	CH-I	5	7,5	10
	CH-III	5	7,5	10
NG'	CH-I	5	7,5	10
	CH-III	5	7,5	10

Os corpos de prova foram ensaiados em quatro tempos de cura: 0, 2, 7 e 14 dias na temperatura de 50°C. O tempo de dois dias de cura foi proposto por Thompson (1970) para avaliar a reatividade do solo com a cal, pois nesse período já é possível observar aumentos de resistência das misturas em relação ao solo natural. Os períodos de 7 e 14 dias foram escolhidos para avaliar o desenvolvimento das reações de cimentação e a sua influência no desempenho da mistura em função do tempo.

Das misturas que obtiveram os maiores valores de resistência nos ensaios mecânicos são apresentados e discutidos os resultados das análises microestruturais. As imagens feitas das amostras, sua composição química e a composição mineralógica, obtidas por meio dos procedimentos de MEV, EDS e DRX, também são mostradas nesse capítulo.

5.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Para o ensaio de resistência à compressão simples (RCS) foram moldados 6 corpos de prova por mistura para cada tempo de cura, totalizando 288 corpos de prova, dos quais metade foi ensaiada sem imersão e a outra metade após 4 horas de imersão. Os solos no estado natural foram moldados e ensaiados imediatamente, pois nessa pesquisa não foi considerada a variação de umidade. Os resultados de RCS dos solos são mostrados na Tabela 17.

Tabela 17 - RCS dos solos no estado natural

Solo	RCS [kPa]
LG'	375
NG'	612

Dos solos utilizados nessa pesquisa, o solo de comportamento não laterítico (NG') no estado natural apresentou um valor de resistência à compressão simples 63% maior que o solo de comportamento laterítico (LG'). Esses valores serviram como base para a avaliação do ganho de resistência das misturas solo-cal.

5.1.1. RCS SEM IMERSÃO

Os resultados (em termos médios) de RCS sem imersão das misturas LG'+cal e NG'+cal são apresentados na Tabela 18. O tratamento estatístico realizado por meio do teste de Grubbs (1969) para a identificação de *outliers* é mostrado no Anexo B.

Tabela 18 - Resistência à compressão simples (kPa)

Mistura		LG' + CH-I			LG' + CH-III		
Teor de cal [%]		5	7,5	10	5	7,5	10
Tempo de cura [dias]	0	385	285	335	331	300	358
	2	493	585	902	360	339	478
	7	650	969	1346	593	649	887
	14	924	1151	1501	752	791	1026
Mistura		NG' + CH-I			NG' + CH-III		
Teor de cal [%]		5	7,5	10	5	7,5	10
Tempo de cura [dias]	0	165	230	280	190	205	175
	2	344	901	1219	235	485	742
	7	403	1039	1622	277	556	754
	14	578	1309	2140	425	906	951

Dos resultados expostos na Tabela 18, observa-se que para o mesmo teor de cal e tempo de cura, as misturas com cal CH-I apresentaram maior resistência à compressão simples que as misturas com CH-III, o que foi atribuído à maior quantidade de óxido de cálcio presente neste tipo de material para a ocorrência das reações pozolânicas.

As misturas com 10% de cal CH-I foram as que apresentaram maiores resultados para ambos os solos, alcançando valores de 2140 kPa após 14 dias de cura, como foi o caso da mistura

NG'+10%CH-I e de 1501kPa para a mistura de LG'+10%CH-I. A Figura 13 apresenta as curvas de tendência de ganho de resistência do solo LG' em função do tempo de cura para os dois tipos de cal.

Figura 13 - RCS das misturas – LG'

No período de cura de 0 dias, as misturas apresentaram valor de RCS abaixo do solo natural, pois uma parcela de solo foi substituída pela cal, um material mais fino, sem que houvesse condições para a ocorrência das reações de cimentação. Esse fato mostra a importância da cura na estabilização de solos com cal.

Após dois dias de cura, já foi possível observar ganhos de resistência em relação ao solo natural. Para as misturas contendo cal CH-I, esse ganho foi maior que para as misturas contendo cal CH-III. Aos 7 dias de cura, todas as misturas já apresentavam valores de RCS maiores que o solo natural. Foi no intervalo de 2 a 7 dias que se observaram as maiores taxas de ganho de resistência e dos 7 aos 14 dias essa taxa diminuiu e a curva apresenta tendências à estabilização. A mistura LG' + 10%CH-I apresentou um ganho de 400% com relação ao solo natural após 14 dias.

A Figura 14 apresenta o resultado de RCS do solo NG' em função do tempo de cura para os dois tipos de cal.

Figura 14 - RCS das misturas – NG'

Assim como para o solo LG', as misturas de solo NG' + cal sem cura prévia apresentaram valores de RCS abaixo do solo natural. Após dois dias de cura a resistência passou a aumentar, no entanto, algumas misturas ainda apresentaram valores de RCS menores que o solo natural. Após os 14 dias de cura a mistura de NG'+10%CH-I apresentou um ganho de resistência absoluto de 350% em relação ao solo natural.

Para o solo NG' as misturas com 5% de cal não resultaram em valores de RCS maiores que o solo natural mesmo após os 14 dias de cura. Isso mostra a importância da dosagem correta das misturas, pois, se insuficientes, os teores de cal não suprirão a demanda de óxido de cálcio (CaO) para a formação dos compostos cimentantes que garantem o aumento de resistência do material.

Os maiores valores de RCS foram obtidos com a adição de 10% de cal CH-I para ambos os solos. Em termos absolutos, o ganho de resistência dos dois materiais foi da mesma ordem, sendo 400% para o solo LG' e 350% para o NG', após 14 dias de cura. Contrariando o método de Thompson (1970), os resultados de RCS obtidos mostram que com a adição de maiores teores de cal foi possível obter bons resultados de resistência para esses materiais. Isso prova que solos de formações geotécnicas distintas podem apresentar reações diferentes após a estabilização e que devem ser melhor avaliados antes de descartados para uso como camadas de pavimentos. A Figura 15 apresenta o resultado de RCS do solo LG' em função do teor de cal.

Figura 15 - RCS das misturas em função do teor de cal- LG'

Dos gráficos da Figura 15, fica evidente o quanto a aplicação do teor adequado de cal influencia na resistência das misturas. As curvas da mistura LG'+CH-I dos 14 e 7 dias de cura apresentam uma tendência quase que linear e crescente. O que não se observa com as misturas LG'+CH-III, que apresentam menores taxas de aumento de RCS. A cura das misturas se mostra uma prática necessária, visto que independentemente do teor de cal utilizado, quando não curadas, as misturas apresentaram valores de resistência abaixo do solo natural. Observa-se para o solo LG', que as misturas contendo 7,5% de CH-I apresentaram valores de RCS equivalentes às misturas contendo 10% de CH-III, isso mostra que apesar da fonte de CaO utilizada o importante é garantir o teor de cal necessário para a ocorrência das reações de cimentação e não necessariamente se deve buscar por materiais de um grau de pureza maior. A Figura 16 apresenta o resultado de RCS do solo NG' em função do teor de cal.

Figura 16 - RCS das misturas em função do teor de cal- NG'

Observa-se para o solo NG', que o teor de 5% de cal foi insuficiente para a estabilização, ainda quando foram adotados períodos de cura mais longos não foram observados aumentos consideráveis de resistência. Com a utilização da cal CH-I há um grande aumento na taxa de variação de RCS quando foram utilizados maiores teores de cal (7,5% e 10%). As curvas das misturas NG'+CH-I ainda apresentam tendência de crescimento. O que não é observado para as misturas com cal CH-III, onde parece haver um teor ótimo de cal de 7,5% e a partir daí não foram obtidos grandes incrementos nos valores de RCS. A adoção de maiores teores de cal CH-III para a estabilização desse solo deve ser avaliada com cuidado, pois uma grande quantidade de finos na mistura pode levar à perda de resistência.

5.1.2. RCS APÓS IMERSÃO

Os resultados dos corpos de prova ensaiados após 4 horas de imersão são mostrados na Tabela 19. Esse procedimento é importante para avaliar se houve cimentação com a adição de cal ao solo. O tratamento estatístico realizado por meio do teste de Grubbs (1969) para a identificação de *outliers* é mostrado no Anexo C.

Tabela 19 - Resistência à compressão simples (kPa) - (Após imersão)

Mistura		LG' + CH-I			LG' + CH-III		
Teor de cal [%]		5	7,5	10	5	7,5	10
Tempo de cura [dias]	0	0	0	0	0	0	0
	2	92	163	383	0	57	170
	7	165	288	493	43	110	212
	14	180	295	533	58	133	275
Mistura		NG' + CH-I			NG' + CH-III		
Teor de cal [%]		5	7,5	10	5	7,5	10
Tempo de cura [dias]	0	0	0	0	0	0	0
	2	105	565	872	0	210	425
	7	165	822	1157	58	295	518
	14	223	954	1364	70	323	620

Os corpos de prova não curados não apresentaram nenhuma resistência à água e se desfizeram poucos minutos após a imersão, impossibilitando a realização do ensaio de RCS. Pelo mesmo motivo não foi possível realizar o ensaio dos corpos de prova contendo 5% de cal CH-III após dois dias de cura.

Nos outros casos, ainda que as misturas tenham apresentado redução no valor de RCS após 4 horas de imersão, não ocorreu desintegração total ou parcial dos corpos de prova. A manutenção dessa parcela de resistência foi atribuída à ocorrência das reações de cimentação nos solos estabilizados, cujos produtos não são afetados pela presença da água, o que não se observou nos solos naturais. As misturas que apresentaram maiores valores de resistência (LG'+10%CH-I e NG'+10%CH-I) foram selecionadas para uma análise comparativa do RCS sem e após imersão (Tabela 20).

Tabela 20 - RCS (kPa) sem imersão e após imersão

Tipo de solo	Tempo de cura	RCS (s/ imersão)	RCS (imersão)	Retenção de RCS [%]
LG'	0	335	0	0
	2	902	383	42
	7	1346	493	37
	14	1501	533	36
NG'	0	280	0	0
	2	1219	872	72
	7	1622	1157	71
	14	2140	1364	64

Observa-se na Tabela 20 que a taxa de retenção da RCS dos corpos de prova ensaiados após a imersão mantém-se praticamente igual após os dois dias de cura. Para a mistura LG'+10%CH-I essa taxa de retenção foi em torno de 40% da RCS dos corpos de prova ensaiados sem imersão. A mistura NG'+10%CH-I manteve 70% da RCS quando ensaiado após a imersão, mostrando que houve uma melhor ação cimentante da cal para o solo argiloso não laterítico.

Ainda que o período de 4h de imersão adotado nesse procedimento pareça ser uma condição muito rigorosa, quando se compara a situações reais de campo, os resultados dos ensaios foram satisfatórios, visto que as taxas de retenção de RCS foram relativamente altas e em alguns casos foram obtidos resultados de RCS maiores que 1MPa mesmo após a imersão.

5.1.3. MÓDULO TANGENTE INICIAL (E_0)

A partir das curvas tensão vs deformação resultante do ensaio de RCS foram determinados os módulos tangentes iniciais (E_0) de cada corpo de prova. Essa análise permitiu observar a

deformabilidade e a variação de rigidez das misturas após a adição de cal. Os resultados dos módulos tangentes iniciais das misturas sem imersão são expressos na Tabela 21.

Tabela 21 - Módulo tangente inicial (MPa)

Mistura		LG' + CH-I			LG' + CH-III		
Teor de cal [%]		5	7,5	10	5	7,5	10
Tempo de cura [dias]	0	45	34	39	39	35	42
	2	57	67	103	42	40	55
	7	75	110	153	68	75	102
	14	106	131	171	86	91	117
Mistura		NG' + CH-I			NG' + CH-III		
Teor de cal [%]		5	7,5	10	5	7,5	10
Tempo de cura [dias]	0	23	31	38	26	28	24
	2	46	118	159	32	64	97
	7	53	135	211	36	73	99
	14	76	170	277	56	118	124

Os resultados de E_0 mostram um comportamento semelhante aos resultados de RCS das misturas. Sendo que, os corpos de prova ensaiados imediatamente após a compactação apresentaram diminuição da rigidez com relação ao solo natural. Logo após os primeiros períodos de cura, houve um ganho de rigidez com o aumento do teor de cal. As misturas com solo NG' apresentaram maior rigidez que as misturas com solo LG'. Bem como as misturas com cal do tipo CH-I apresentaram maior rigidez que as misturas com cal CH-III, quando observados os mesmos teores de estabilizantes.

Para uma melhor visualização dos resultados, a Tabela 22 apresenta os valores do módulo tangente inicial aos 14 dias de cura para todas as misturas contendo cal do tipo CH-I e o ganho de rigidez quando comparadas aos solos no estado natural.

Dos resultados expostos da Tabela 22, observa-se que o solo LG' quando estabilizado apresentou maiores ganhos relativos de rigidez que o solo NG'. O solo NG' quando estabilizado com 5% de cal apresentou rigidez inferior ao solo no estado natural mesmo após 14 dias de cura, com isso, fica evidente que teores baixos de cal não proporcionam grandes ganhos de rigidez nas misturas, de modo que, a mistura poderá apresentar um desempenho mecânico inferior ao solo no estado natural.

Tabela 22 - Ganho relativo de rigidez das misturas após 14 dias de cura

Tipo de solo	Teor de cal [%]	E_0 [MPa]	Diferença [MPa]	Ganho [%]
LG'	0	44		
	5	106	62	141
	7,5	131	87	198
	10	171	127	289
NG'	0	80		
	5	76	-4	-5
	7,5	170	90	113
	10	277	197	246

Outrossim, foram determinados os módulos tangentes iniciais dos corpos de prova ensaiados após imersão. A Figura 17 apresenta a variação de rigidez das misturas em função do teor de cal empregado na estabilização.

Figura 17 - Variação do E_0 em função do teor de cal (após imersão)

Dos gráficos da Figura 17, fica evidente o quanto a porcentagem de cal influencia na rigidez da mistura. Para ambos os solos, nota-se uma grande diferença de rigidez quando o teor de cal é variado de 5% a 10%. Para o solo LG', o tempo de cura não teve tanta relevância na rigidez quanto o teor de cal, pois a partir dos dois dias de cura as curvas evoluem juntas e apresentam taxas de crescimento similares.

Para o solo NG', a utilização do teor de cal adequado para o desenvolvimento de reações pozolânicas na mistura influenciou mais no seu desempenho que o tempo de cura. Visto que

as misturas com 5% de cal mesmo após 14 dias de cura apresentaram resultados de rigidez inferiores ao solo natural.

5.2. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

A partir dos ensaios de módulo de resiliência (MR) e por meio de regressões estatísticas, foram calibrados quatro modelos matemáticos. Desses quatro modelos, foi selecionado aquele que melhor representou o MR dos corpos de prova, em função do coeficiente de correlação (R^2). A título de comparação, a Tabela 23 apresenta as médias dos R^2 dos modelos empregados nessa pesquisa. Uma tabela com os modelos calibrados dos 50 corpos de prova ensaiados é mostrada no Anexo D.

Tabela 23 - Média de R^2 dos modelos de MR

Modelo	Função de σ_d	Função de σ_3	Modelo Composto	Modelo Universal
LG'	0,56	0,47	0,91	0,89
LG' + CH-I	0,71	0,49	0,90	0,87
LG' + CH-III	0,81	0,42	0,94	0,93
NG'	0,46	0,55	0,92	0,84
NG' + CH-I	0,60	0,46	0,88	0,79
NG' + CH-III	0,78	0,38	0,93	0,83
Geral	0,65	0,46	0,91	0,86

Observa-se que o modelo em função da tensão confinante (σ_3) é o que pior representa o MR dos materiais, seguido do modelo que leva em consideração somente a tensão desvio (σ_d). O modelo que melhor representou o MR dos corpos de prova foi o modelo composto, pois apresentou maior coeficiente de correlação. Para os solos no estado natural, os modelos que levam em consideração somente a σ_d e a σ_3 , apresentaram valores de R^2 próximos. No entanto, após a estabilização, observa-se que o modelo de σ_d apresentou melhor ajuste que o que leva em consideração somente σ_3 , esse resultado foi atribuído às mudanças texturais que os solos sofreram após a adição da cal. As Figuras 18 e 19 mostram o comportamento resiliente, dos solos LG' e NG' no estado natural, respectivamente.

Figura 18 - Representação do modelo composto para o solo LG'

Figura 19 - Representação do modelo composto para o solo NG'

Observa-se das superfícies das figuras que, o solo LG' apresentou comportamento resiliente similar ao solo NG'. Os módulos de resiliência dos solos no estado natural foram mais influenciados pela tensão confinante que pela tensão desvio. De modo que, para baixos valores de tensão desvio e altos valores de tensão confinante, ambos os materiais

apresentaram seus valores máximos de MR. As Figuras 20 e 21 representam o comportamento resiliente das misturas LG'+10%CH-I e NG'+10%CH-I após 14 dias de cura, respectivamente.

Figura 20 - Representação do modelo composto para a mistura LG'+10%CH-I

Figura 21 - Representação do modelo composto para a mistura NG'+10%CH-I

Após a estabilização com 10% de cal CH-I e cura de 14 dias, o comportamento resiliente dos solos muda de forma que passa a sofrer uma maior influência da tensão desvio. Segundo Svenson (1981) e Mohammad e Saadeh (2008), isso ocorre devido às mudanças na textura do material que fazem com que as misturas solo-cal passem a se comportar como um solo

granular e, portanto, seu comportamento resiliente passa a ser influenciados tanto pela tensão desvio quanto pela tensão confinante. Os valores máximos de MR das misturas foram obtidos para baixos valores de tensão confinante e de tensão desvio.

5.2.1. MR POR TENSÕES DEFINIDAS

A partir do modelo composto, foram calculados valores fixos de MR para todos os corpos de prova. Para o cálculo, foi adotado o par de tensões: $\sigma_d = 41,3\text{kPa}$ e $\sigma_3 = 13,8\text{kPa}$ que pode representar as tensões atuantes em um subleito de pavimento (LITTLE, 2000; SOLANKI ET AL., 2010; KLINSKY ET AL., 2014). Os valores de módulo de resiliência dos solos no estado natural são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - MR por tensões definidas dos solos no estado natural

Solo	MR [MPa]
LG'	146
NG'	196

Para os solos no estado natural compactados na energia Proctor normal, o solo NG' apresentou um valor de MR 34% maior que o solo LG'. Esse resultado vai contra o que é exposto na literatura, pois esperava-se que o solo de comportamento laterítico apresentasse maiores valores de módulo que o solo de comportamento não laterítico. Os resultados de MR das misturas solo-cal são apresentados na Tabela 25.

Pela análise por tensões definidas, observa-se uma tendência de aumento do MR com o aumento da porcentagem de cal utilizada na mistura e em tempos de cura mais longos. Quando dosadas na mesma porcentagem, as misturas com cal do tipo CH-I apresentaram maiores valores de módulo de resiliência que as misturas com cal CH-III. Essa mesma tendência foi observada nos resultados de RCS. Para uma melhor visualização dos resultados, a Figura 22 apresenta as tendências de aumento de MR em função do tempo de cura para o solo LG'.

Tabela 25 - MR por tensões definidas das misturas solo-cal

Mistura		LG' + CH-I			LG' + CH-III		
Teor de cal [%]		5	7,5	10	5	7,5	10
Tempo de cura [dias]	0	126	138	112	90	63	84
	2	320	441	680	334	391	536
	7	708	1019	1545	413	450	662
	14	990	1378	1958	430	659	860
Mistura		NG' + CH-I			NG' + CH-III		
Tempo de cura [dias]	0	108	179	152	74	94	88
	2	151	404	1618	116	300	1301
	7	253	1848	2187	122	412	1838
	14	288	1978	2418	169	606	2034

Figura 22 - MR das misturas – solo LG'

Para o solo LG', os corpos de prova que não foram curados apresentaram um valor de MR abaixo do solo natural, esse mesmo comportamento também foi observado nos resultados de RCS. Após 2 dias de cura, todas as misturas já apresentavam valores de módulo de resiliência superiores ao do solo sem adição de cal.

As misturas com cal do tipo CH-I apresentaram grandes taxas de aumento de MR ao longo do período de cura, atingindo valores de 1958 MPa após 14 dias. Por outro lado, para as misturas contendo cal CH-III, a taxa de aumento do MR foi menor, isso pode ser atribuído a menor concentração de CaO presente nesse tipo de cal que faz com que as reações de cimentação ocorram de forma mais lenta. A Figura 23 apresenta a tendência de aumento de MR em função do tempo de cura para o solo NG'.

Figura 23 - MR das misturas - solo NG'

Assim como para o solo LG', as misturas não curadas de solo NG' + cal apresentaram valores de MR abaixo do solo no estado natural. Após 2 dias de cura, as misturas contendo 5% de cal ainda resultaram em valores de MR menores que o do solo sem adição de cal. Pode-se dizer que, baixos teores de cal incorporados à mistura influenciaram mais no desempenho mecânico do solo de comportamento não laterítico que no do solo de comportamento laterítico.

As misturas com cal CH-I resultaram em valores mais altos de MR que as misturas com cal do tipo CH-III. Após 14 dias de cura, as misturas contendo 10% de cal apresentaram altos ganhos em relação ao solo no estado natural. Para a mistura NG'+10%CH-I esse ganho foi de 1130% e para a mistura NG'+10%CH-III de 937%.

5.2.2. MR POR TENSÕES DO PAVIMENTO HIPOTÉTICO

No processo iterativo de cálculo do MR por tensões do pavimento hipotético, inicialmente adotou-se um valor de MR arbitrário para a camada de sub-base do pavimento. As tensões atuantes no centro dessa camada foram calculadas pelo programa ELSYM 5®. Em seguida, usando o modelo composto, calculou-se o novo valor de MR a ser inserido no programa com esse par de tensões. Esse procedimento foi repetido até que os valores de MR apresentassem diferenças menores que 1%. As tensões calculadas pelo programa e os valores de MR calculados pelo modelo composto para cada corpo de prova são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - MR e tensões atuantes no pavimento hipotético

Condição	Dias de cura	σ_3	σ_d	MR [MPa]	Condição	Dias de cura	σ_3	σ_d	MR [MPa]
LG'	0	90	27	348	NG'	0	93	31	368
LG' + CH-I					NG' + CH-I				
5%	0	72	9	248	5%	0	50	13	205
	2	79	16	308		2	79	16	225
	7	110	48	516		7	79	17	359
	14	107	45	391		14	87	24	334
7,5%	0	77	15	281	7,5%	0	75	12	277
	2	83	21	319		2	132	69	828
	7	139	76	996		7	137	74	940
	14	138	75	961		14	143	80	1130
10%	0	80	17	223	10%	0	83	21	317
	2	108	46	499		2	149	85	1437
	7	130	67	773		7	147	71	6525
	14	146	83	1262		14	146	83	1289
LG' + CH-III					NG' + CH-III				
5%	0	74	12	236	5%	0	9	50	58
	2	92	30	375		2	49	14	242
	7	100	38	431		7	52	11	274
	14	97	34	396		14	81	18	303
7,5%	0	7	54	47	7,5%	0	39	24	186
	2	99	36	406		2	90	28	352
	7	103	41	450		7	119	57	612
	14	123	61	665		14	108	46	496
10%	0	25	38	102	10%	0	42	21	165
	2	127	65	730		2	123	61	681
	7	117	55	583		7	123	61	677
	14	107	45	481		14	143	80	1146

Uma análise comparativa dos dois procedimentos de cálculo do MR permite observar que os valores de MR calculados pelas tensões do pavimento hipotético foram menores que os valores calculados por tensões definidas. Isso se deve ao fato de que no primeiro procedimento de cálculo foram usadas tensões representativas de uma camada de subleito de pavimento, onde as tensões atuantes não são tão altas porque as camadas superiores apresentam maior rigidez.

No cálculo do MR por tensões do pavimento hipotético foi adotada uma camada de sub-base de pavimento, onde as tensões atuantes foram maiores devido ao tipo de estrutura utilizada. Como visto dos gráficos tridimensionais de comportamento resiliente das misturas, para baixos valores de tensão desvio e tensão confinante são obtidos os maiores valores de MR. Das tensões encontradas nos dois procedimentos de cálculo, deve-se verificar se os materiais satisfazem as exigências mínimas do projeto em questão para ser utilizados como reforço de subleito ou sub-base de pavimentos.

De acordo com a instrução de projeto IP-DE-P00-001 do DER-SP, solos finos melhorados com cimento apresentam valores de MR entre 200 e 400 MPa. Portanto, dos resultados das duas análises, infere-se que com adição de 7,5% de cal CH-I e 10% de cal CH-III são obtidos valores satisfatórios de MR quando comparados com valores normativos para projetos de pavimentos, dadas condições de cura compatíveis às adotadas nessa pesquisa.

5.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

As imagens das superfícies das amostras de solo natural e solo-cal foram realizadas com aumentos de 3.000 e 7.500x, a fim de identificar mudanças na textura do material e a presença de estruturas que indiquem a ocorrência de cimentação. A Figura 24 apresenta as imagens com aumento de 3.000x para o solo LG' (Figura 24(a)) e para a mistura LG'+10%CH-I em diferentes períodos de cura (Figuras 24(b), (c) e (d)).

a) LG'

b) 2 dias de cura

c) 7 dias de cura

d) 14 dias de cura

Figura 24 - Imagens com aumento de 3.000x – LG'

Da análise das imagens, observa-se que a microestrutura do solo natural é diferente da mistura solo-cal. Comparando as Figuras 24(a) e 24(b), nota-se que com adição de cal ocorreram mudanças texturais no solo que passa a ter um aspecto de solo granular. Essas alterações na matriz podem ser atribuídas às reações iniciais entre o solo e a cal, como observado nos estudos de Choquette et al (1987) e Velasco (2013) e explicam a mudança do comportamento resiliente dos materiais.

Com o aumento do período de cura (Figuras 24(b) e 24(c)), observam-se mudanças de forma nas bordas dos grãos e novas estruturas em forma de blocos que revestem e reúnem as partículas de solo fazendo os vazios menores, o que gerou os aumentos na resistência e rigidez da mistura. Para melhor visualização das fases cimentícias, na Figura 25 são apresentadas imagens com aumentos de 7.500x para o solo LG' e para a mistura LG'+10%CH-I em diferentes períodos de cura.

a) LG'

b) 2 dias de cura

c) 7 dias de cura

d) 14 dias de cura

Figura 25 - Imagens com aumento de 7.500x – LG'

As imagens mostram que, após a adição de cal a matriz apresenta uma aparência floculada com formação de grumos e aglomerados de solo. Nos longos períodos de cura (Figuras 25(c) e 25(d)) observa-se a formação de novos compostos na forma de grumos como os encontrados nos estudos realizados por Eisazadeh et al. (2011). Segundo esses autores, essa é a fase inicial dos produtos cimentantes resultantes das reações pozolânicas.

A Figura 26 apresenta as imagens com aumento de 3.000x para o solo NG' (Figura 26(a)) e para a mistura NG'+10%CH-I em diferentes períodos de cura (Figuras 26(b), (c) e (d)).

a) NG'

b) 2 dias de cura

c) 7 dias de cura

d) 14 dias de cura

Figura 26 - Imagens com aumento de 3.000x – NG'

Assim como para o solo laterítico, após a adição de cal observa-se uma mudança na forma lamelar das partículas do solo para uma forma granular (Figuras 26(b) e 26(c)). Esses novos materiais se aglomeram e se desenvolvem ao redor das partículas preenchendo os vazios. A Figura 27 mostra as imagens com aumento de 7.500x para o solo NG' e para a mistura NG'+10%CH-I em diferentes períodos de cura.

a) NG'

a) 2 dias de cura

c) 7 dias de cura

d) 14 dias de cura

Figura 27 - Imagens com aumento de 7.500x – NG'

Com uma magnificação maior das imagens, é possível observar a formação de uma estrutura em forma de favos ao redor das partículas, bem como uma camada de gel envolvendo os grãos (Figura 27(c)). Na Figura 27(d), nota-se a presença de uma rede interligada de placas finas e fibras, essa fase cimentícia foi encontrada por Arabi e Wild (1986) em misturas de solo+10% de cal com 3 semanas de cura. De acordo com os autores, para maiores períodos de cura essa estrutura evolui para uma rede contínua de fibras que garante maior resistência à mistura.

5.4 ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA

A técnica de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foi empregada para identificar comparativamente mudanças químicas nas amostras de solo estabilizado em relação aos solos no estado natural. Os ensaios de EDS foram realizados nas mesmas regiões de onde foram feitas as imagens de MEV. A composição química das porções analisadas das misturas contendo 10% de cal CH-I e de cal CH-III são apresentadas nas Tabelas 27 e 28, respectivamente.

Tabela 27 - Composição química das misturas com 10% de cal CH-I

Elemento	Concentração (%)							
	LG'	LG' + 10%CH-I			NG'	NG' + 10%CH-I		
		2 dias	7 dias	14 dias		2 dias	7 dias	14 dias
Al	23,40	23,43	23,44	23,66	11,58	20,46	19,02	19,39
Fe	9,11	2,78	2,59	2,58	36,60	4,61	3,31	3,36
O	47,21	47,16	47,57	47,67	39,38	47,51	46,76	46,71
Si	18,96	18,72	19,27	19,49	10,70	21,03	20,01	20,34
Ti	1,32	0,91	1,11	1,19	1,74	0,58	0,47	1,48
Ca	-	4,63	3,32	3,21	-	2,86	5,44	6,30
Mg	-	1,88	2,26	1,73	-	2,72	4,67	1,87
K	-	0,49	0,44	0,47	-	0,23	0,32	0,55
Soma	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Ca/Si	-	0,25	0,17	0,16	-	0,14	0,27	0,31

Tabela 28 - Composição química das misturas com 10% de cal CH-III

Elemento	Concentração (%)							
	LG'	LG' + 10%CH-III			NG'	NG' + 10%CH-III		
		2 dias	7 dias	14 dias		2 dias	7 dias	14 dias
Al	23,40	18,25	21,52	24,04	11,58	20,44	18,6	18,88
Fe	9,11	1,91	2,52	2,57	36,6	2,44	3,04	3,19
O	47,21	45,41	46,59	47,63	39,38	47,95	46,86	47,45
Si	18,96	15,79	18,06	18,94	10,7	22,31	20,27	21,3
Ti	1,32	0,27	0,37	0,38	1,74	0,22	0,43	0,5
Ca	-	7,21	6,19	3,36	-	4,32	5,5	3,25
Mg	-	11,06	4,64	2,95	-	2,11	5,17	5,24
K	-	0,1	0,11	0,13	-	0,21	0,13	0,19
Soma	100	100	100	100	100	100	100	100
Ca/Si	-	0,46	0,34	0,18	-	0,19	0,27	0,15

Da composição química dos solos naturais, observa-se que ambos os materiais são compostos dos mesmos elementos: Alumínio (Al), Ferro (Fe), Oxigênio (O), Silício (Si) e Titânio (Ti). Há uma concentração maior de Fe na porção de solo NG' analisada do que na de LG'. Já os elementos Al e Si foram encontrados em maior quantidade na porção de solo LG'. Na composição química das misturas foi constatada a presença de Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg), o que é consistente com a adição de cal.

Uma análise foi realizada em função da variação da taxa de Ca/Si. Segundo Ghosh e Subbarao (2001), a diminuição da taxa de Ca/Si com o período de cura indica a formação de novos compostos cimentantes. Observa-se dos resultados que houve uma redução da taxa de Ca/Si para o solo LG' em função do tempo de cura quando o solo foi estabilizado com as duas cales. Entre os tempos de 2 e 7 dias de cura, essa redução foi mais acentuada, período no qual foram observadas as maiores taxas de ganho de resistência e rigidez da mistura. Para o solo NG', a taxa de Ca/Si apresentou uma grande variação. Segundo Eisazadeh et al (2011), isso indica que a composição química do solo não mudou significativamente com a adição de cal.

5.5 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Os ensaios de DRX foram realizados nos solos no estado natural com o objetivo de identificar os minerais presentes na fração argila. Nas misturas solo-cal, essa técnica foi empregada para observar se houve consumo desses argilominerais no processo de estabilização e/ou a formação de novos compostos cristalinos. Os resultados das análises do solo LG' e das misturas LG +10%CH-I são mostrados nos difratogramas da Figura 28. E na Figura 29 são mostrados os difratogramas do solo NG' e das misturas NG'+10%CH-I.

O resultado de DRX do solo LG' evidenciou a presença dos seguintes minerais: caulinita (C), hilebrandita (H) e quartzo (Q) como os minerais constituintes da porção analisada. Na porção de solo NG' foram identificados os minerais: caulinita (C), hilebrandite (H), quartzo (Q) e kilchoanita (K). Segundo Nogami e Villibor (1995), a caulinita é o principal mineral encontrado na fração argila de solos lateríticos e o quartzo é o mineral predominante nas frações areia e silte desses solos. Ainda segundo Nogami e Villibor (1995), solos de comportamento não laterítico também podem apresentar caulinita como argilomineral predominante.

Figura 28 - Resultados DRX solo LG' e misturas LG'+10%CH-I

Figura 29 - Resultados DRX solo NG' e misturas NG'+10%CH-I

Não foi constatada nenhuma grande redução nos picos referente à caulinita nas amostras de solo estabilizado. Segundo Eades and Grim (1960), a cal reage primeiro com os produtos

amorfo presentes no solo e só ataca a estrutura cristalina (argilominerais) após ter consumido todo esse material. Segundo Choquette et al (1987), por ser um mineral muito estável, é comum que não haja alterações nos picos de caulinita para baixos teores de cal e curtos períodos de cura.

Os difratogramas dos solos estabilizados mostram a presença de novos picos em $2\theta = 21,9^\circ$ e $29,22^\circ$ nas misturas de solo LG' + 10%CH-I a partir do segundo dia de cura. O mesmo acontece para as amostras de solo NG'+10%CH-I, onde se observa o surgimento de novos picos em $2\theta = 29,32^\circ$ e $42,78^\circ$. Esses picos, assim como os encontrados nos estudos de Arabi e Wild (1986) e Eisazadeh et al. (2011), indicam a ocorrência das reações pozolânicas e a formação de novos compostos cimentantes.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Essa pesquisa teve por objetivo principal avaliar a aplicação dos métodos de dosagem de cal mais usados na pavimentação para estabilização de um solo de comportamento laterítico e um não laterítico. Especificamente, no programa experimental foram analisados: a) a aplicação dos métodos de dosagem de Eades e Grim (1966) e de Thompson (1970) na determinação do teor de cal, b) o comportamento de dois solos de características geotécnicas diferentes quando estabilizados com cal, c) o efeito de diferentes tipos de cales na estabilização desses solos, d) o efeito da adição de cal na resistência à compressão simples e no módulo de resiliência e e) as mudanças que a adição de cal provocou na microestrutura dos solos. As principais conclusões obtidas com os resultados desse trabalho foram:

- Quanto aos métodos de dosagem aplicados

Os métodos de dosagem aplicados nesse trabalho, desenvolvidos para solos de clima temperado, não convergiram quanto ao teor de cal necessário para a estabilização. Os resultados variaram com relação ao tipo de solo e ao tipo de cal utilizada, sempre apontando baixas porcentagens de cal, o que poderia acarretar em misturas com teores insuficientes de CaO para a ocorrência das reações pozolânicas.

Os resultados evidenciaram que os principais métodos de dosagem utilizados no Brasil não indicaram teores de cal que garantam uma estabilização eficiente, nem o atendimento das exigências mínimas do projeto. Como visto nos ensaios mecânicos, os solos utilizados nessa pesquisa necessitaram de teores maiores de cal do que aqueles apontados pelos métodos para apresentar ganhos significativos de resistência e rigidez.

- Quanto ao comportamento dos solos

Os dois solos utilizados quando estabilizados com cal apresentaram mudanças nas suas características físicas. Após a adição de cal houve uma redução no índice de plasticidade, o que confere melhor trabalhabilidade ao material. Houve um aumento na umidade ótima de compactação e uma diminuição da massa específica seca máxima da mistura, o que foi atribuído ao entrosamento entre as partículas do solo em decorrência das reações de floculação e aglomeração.

Os solos apresentaram comportamentos similares de aumentos de resistência e rigidez após a adição de cal, porém a estabilização foi mais eficiente para o solo de comportamento laterítico, que apresentou maiores ganhos com relação ao solo no estado natural. Foi mostrado que, com o teor e o tipo de cal adequado utilizado na mistura, os dois materiais apresentaram bom desempenho mecânico e devem ser melhor avaliados antes de serem descartados para a utilização na construção de estradas.

- Quanto ao efeito do tipo de cal

As misturas contendo cal do tipo CH-I apresentaram melhor desempenho mecânico que as misturas contendo cal do tipo CH-III, devido a sua maior concentração de CaO para a ocorrências das reações entre o solo e a cal, que modificam a estrutura do material e conferem aumentos de resistência e rigidez à mistura. Porém, deve-se ainda investigar se cales com teores maiores de CaO provocariam mudanças significativas nos resultados, dessa forma pode ser possível avaliar se o potencial de ganho da mistura está relacionado ao tipo de cal ou tipo de argilomineral presente no solo.

- Quanto ao efeito da adição de cal no desempenho mecânico da mistura

As misturas quando estabilizadas e curadas em condições adequadas apresentaram ganhos significativos de resistência à compressão simples, aumentos no valor do módulo de resiliência e mantiveram uma parcela de resistência e rigidez, mesmo após a imersão em água, o que evidenciou a cimentação decorrente das reações pozolânicas. Com baixos teores de cal e sem cura prévia, as misturas apresentaram desempenho mecânico inferior aos solos no estado natural.

- Quanto ao efeito da adição de cal na microestrutura do solo

As imagens de MEV mostraram que a textura dos solos mudou após a adição de cal. Foi observada a formação de blocos e grumos, resultantes das reações de trocas catiônicas e de aglomeração e floculação que acontecem poucos minutos após a adição de cal. Foi possível observar o início da formação dos compostos cimentantes das reações pozolânicas, como a presença de uma camada de gel recobrindo as partículas de solo, porém, como as reações com a cal acontecem de forma mais lenta, tempos de cura mais longos devem ser observados.

Quanto à análise química dos solos (EDS), a adição de cal não resultou em mudanças significativas na composição dos materiais, visto que não foi possível determinar quais elementos influenciaram mais na estabilização dos solos estudados. Porém, foram detectadas mudanças da forma e o surgimento de novos picos cristalinos nos resultados de DRX dos solos estabilizados, o que indica a formação de novos compostos cimentantes decorrentes das reações pozolânicas.

6.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

No desenvolvimento do programa experimental foram constatados alguns parâmetros que ainda podem ser avaliados em pesquisas futuras, tais como:

- Adotar períodos mais longos ou temperaturas mais elevadas para avaliar o efeito de diferentes condições de cura na estabilização;
- Utilizar cales calcílicas ou que apresentem maiores teores de CaO na estabilização de solos;
- Utilizar outros métodos de dosagem que levem em consideração parâmetros diferentes dos que foram adotados nessa pesquisa;
- Avaliar o comportamento das misturas em ensaios de capilaridade;
- Estudar o comportamento à deformação permanente e à fadiga de misturas solo-cal.

Por fim, é importante salientar que a investigação dos parâmetros que influenciam no processo de estabilização de solos com cal deve ser continuada, pois a falta de um método e a inadequação dos métodos existentes para aplicação em solos de clima tropical pode ser a explicação para o insuficiente desempenho dessas misturas, o que pode estar contribuindo para o descarte ou não aproveitamento de materiais marginais que poderiam ser aplicados na construção de pavimentos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKOTO, B. K. A. The effect of repeated loading on the ultimate unconfined compressive strength of a lime-stabilized laterite. **Engineering Geology**, v. 23, n. 2, p. 125-135, 1986.

ALCÂNTARA, M. A. M.; LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; COSTA, L. M. Considerações sobre o uso de aditivos químicos em regiões tropicais. **29ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**, p. 100-110, 1995.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 307-99**: Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. Washington, 1999.

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.

ARABI, M.; WILD, S. Microstructural development in cured soil-lime composites. **Journal of Materials Science**, v. 21, n. 2, p. 497-503, 1986.

ARAÚJO, A. F. **Avaliação de Misturas de Solos Estabilizados com Cal, em Pó e em Pasta, para Aplicação em Rodovias do Estado do Ceará**. 2009. Dissertação de Mestrado (Programa de Mestrado em Engenharia do Transportes), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: 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.

_____. **NBR 6457**: Amostras de solo: Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 7175**: Cal Hidratada para Argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

ATTOH-OKINE, N. O. Lime treatment of laterite soils and gravels—revisited. **Construction and Building Materials**, v. 9, n. 5, p. 283-287, 1995.

BEHAK, L. Performance of Full-Scale Test Section of Low-Volume Road with Reinforcing Base Layer of Soil-Lime. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. v. 2204, pp. 158-164. Washington, US: Transportation Research Board, 2011.

BELL, F. G. Lime stabilization of clay minerals and soils. **Engineering Geology**, v. 42, n. 4, p. 223-237, 1996.

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

CASTRO, F. J. C. de O. **Contribuição ao conhecimento e à determinação da reatividade de solos sesquioxídicos utilizando o hidróxio de cálcio: aplicação ao processo de geopolimerização (Estabilização)**. 1995. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

CHAUNSAI, P.; PEETHAMPARAN, S. Microstructural and mineralogical characterization of cement kiln dust-activated fly ash binder. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2164, p. 36-45, 2010.

CHOQUETTE, M.; BÉRUBÉ, M.; LOCAT, J. Mineralogical and microtextural changes associated with lime stabilization of marine clays from eastern Canada. **Applied Clay Science**, v. 2, n. 3, p. 215-232, 1987.

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

DE CARVALHO, J. B. Q. **Soil Properties Affecting the Lime Stabilization of Red Tropical Soils from North East Brazil**. 1979. Tese de Doutorado. Department of Civil Engineering-The University of Leeds.

_____. Propriedades e comportamentos de solos lateríticos estabilizados com cal. 1988. **23ª Reunião Anual de Pavimentação**, v. 1, p.690-706. Florianópolis, SC, 1988.

DELGADO, A. K. C. **Estudo do Comportamento Mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na Pavimentação Rodoviária**. 2007. 392p. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Brasília, Distrito Federal.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO. **DER M13-71: Ensaio de Compactação de Solos**. São Paulo, 1971.

_____. **DER M53-71: Índice de Suporte Califórnia (CBR)**. São Paulo, 1971.

_____. **DER M196-89: Classificação de Solos Tropicais Segundo a Metodologia MCT**. São Paulo, 1989.

_____. **DER IP-DE-P00/001: Projeto de Pavimentação**. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Pavimentação. 3.ed.** Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT 108/2009-ES: Terraplenagem – Aterros – Especificação de Serviços**. Rio de Janeiro: IPR.

DIAMOND, S.; KINTER, E. B. Mechanisms of soil-lime stabilization: an interpretative review. **Highway Research Record**. N. 92. Washington, US: Transportation Research Board, 1965.

DUNCAN, J. M.; CHANG, C. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. **Journal of Soil Mechanics & Foundations Div**, 1970.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. **Highway Research Board Bulletin**, n. 262, 1960.

_____. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. **Highway Research Record** 139, pp. 61-72. National Research Council. Washington, US, 1966.

EISAZADEH, A.; KASSIM, K. A.; NUR, H. Characterization of phosphoric acid-and lime-stabilized tropical lateritic clay. **Environmental Earth Sciences**, v. 63, n. 5, p. 1057-1066, 2011.

EREN, Ş.; FILİZ, M. Comparing the conventional soil stabilization methods to the consolidated system used as an alternative admixture material in Isparta lateritic material. **Construction and Building Materials**. v. 23, pp. 2473-2480. Amsterdam, NL: Elsevier, 2009.

GHOSH, A.; SUBBARAO, C. Microstructural development in fly ash modified with lime and gypsum. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 13, n. 1, p. 65-70, 2001.

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.

GUTIERREZ, N. H. M.; KRÜGER, C. A.; NÓBREGA, M. T. Efeitos da adição de cal e cimento nas propriedades físicas e mecânicas de um solo argiloso laterítico. In: **XI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (COBRAMSEG)**. 1998. p. 1191-1197.

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

KLINSKY, L. M. G. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição residual em camadas de pavimentos**. 2013. 225 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

KLINSKY, L. M. G.; FARIA, V. C.; LEAL, A. D. **Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Estabilizados com Cal Hidratada**. 129 p. 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.

LE ROUX, A. Traitement des sols argileux par la chaux. **Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées**, Paris (40), p. 59-95, 1969.

LIMA, D. C. **Algumas considerações relativas a 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.

LOCAT, J.; TREMBALY, H.; LEROUEIL, S. Mechanical and hydraulic behaviour of a soft inorganic clay treated with lime. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 33, n. 4, p. 654-669, 1996.

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

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.

MOHAMMAD, L.; SAADEH, S. Performance evaluation of stabilized base and subbase material. In: **GeoCongress 2008 Conference**. Conference proceedings... pp 1073-1080. New Orleans, US: ASCE, 2008.

MUHMED, A.; WANATOWSKI, D. Effect of lime stabilisation on the strength and microstructure of clay. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)**, v. 6, n. 3, p. 87-94, 2013.

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.

ONITSUKA, K.; MODMOLTIN, C.; KOUNO, M. **Investigation on microstructure and strength of lime and cement stabilized Ariake clay**. Faculty of Science and Technology of Saga University, v. 30, n. 1, p. 49-63, 2001.

ORMSBY, W. C.; KINTER, E. B. **Effects of dolomitic and calcitic limes on strength development in mixtures with two clay minerals**. Federal Highway Administration, 29p. Washington, US, 1972.

OSINUBI, K. J. Influence of compactive efforts and compaction delays on lime-treated soil. **Journal of Transportation Engineering**, v. 124, n. 2, p. 149-155, 1998.

PARREIRA, A. B.; CARMO, C. A. T.; CUNTO, F. J. C. Estudo do módulo de resiliência de materiais usados em pavimentação. **31ª Reunião Anual de Pavimentação**, São Paulo/SP, ABPv, Rio de Janeiro, 1998.

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.

SANTOS, G. T.; POMATTI, K. E. Estabilização do Solo da Região de São Pedro de Alcântara/SC visando a Utilização na Pavimentação. **32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**, p. 43-52, 2000.

SILVA, M. F. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um não laterítico**. 2016. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.

SILVA JR., W. S. **Estudo para 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, 2010.

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. In: **Ground Improvement**, N.2, pp.27-32. 1998

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.

SOLANKI, P.; ZAMAN, M. Microstructural and mineralogical characterization of clay stabilized using calcium-based stabilizers. In: **Scanning Electron Microscopy**. InTech, 2012.

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.

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

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.

_____. Suggested method of mixture design procedure for lime-treated soils. In **Special Technical Publication 479: Special Procedures for Testing Soil and Rock for Engineering Purposes**, ASTM, Philadelphia, Pa., 1970.

_____. Soil-lime mixtures for construction of low-volume roads. **TRB Special Report**. N. 160, pp. 149-165. Washington, US: Transportation Research Board, 1975.

TRAN, T. D. et al. Effects of lime treatment on the microstructure and hydraulic conductivity of Héricourt clay. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 6, n. 5, p. 399-404, 2014.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Lime stabilization: reactions, properties, design, and construction. **State of the Art Report 5**. 59 p. Washington, US: Transportation Research Board, 1987.

VELASCO, E. S. **Scanning electron microscope (SEM) as a means to determine dispersibility**. 2013. 204 p. Thesis (Master in Geotechnical Engineering) – Iowa State University, Ames, US, 2013.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico**. Disponível em: <http://www.mapadaobra.com.br/archives/FispqCalHidratadaItau.pdf>. Acesso em 08 de maio. 2016.

WILLOUGHBY, D. R. et al. **The identification of reaction products in alkali-stabilized clays by electron microscopy, x-ray and electron diffraction**. Defence Standards Labs Maribyrnong, Australia, 1968.

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

ANEXO A

Data: 18.12.2014	FICHA TÉCNICA DE PRODUTO	CAL CH-I	REVISÃO: 05
-----------------------------------	--------------------------	----------	--------------------

Descrição: Cal CH-I.

Denominação Química: Hidróxido de Cálcio e Magnésio.

Origem: Rocha Calcária Dolomítica

Embalagem: Sacos de papel foliados com 20 kg, com variação de 1%, ou em Big Bags de 800 Kg

IDENTIFICAÇÃO: VALIDADE: 01 ANO APÓS A DATA DE FABRICAÇÃO. SE ARMAZENADO EM LOCAL SECO.

Laudo Técnico: Encaminhado junto a Nota Fiscal da carga.

ACONDICIONAMENTO: SOBRE PALLET DE MADEIRA OU BIG BAGS.

Características Físicas	Características Químicas %
	Perda ao Fogo = <=28,0 %
Retenção # 200 < = 10%	CaO = 40,0 %
	MgO = 30,2 %

Ficha de Segurança

1 – IDENTIFICAÇÃO DOS PERIGOS:

- **Perigos mais importantes:** Excesso de partículas em suspensão no ar;
- **Efeitos adversos à saúde humana:**
Ingestão: Pode causar irritação do aparelho digestivo.

Inalação: Pode causar irritação nas vias respiratórias.

Olhos: Em contato com os olhos pode causar irritação ou eventual queimadura na conjuntiva.

Contato com a pele: Em casos de contato prolongado pode causar irritação moderada.

- **Perigos específicos:** Produto incompatível com ácidos;

2 – MEDIDAS DE PRIMEIROS SOCORROS:

- **Inalação:** Em caso de inalação remova a vítima para local bem arejado e acione o serviço médico mais próximo.
- **Ingestão:** Se a vítima estiver consciente, forneça água ou leite em abundância, não induzir ao vômito. Jamais ministre nada a uma pessoa inconsciente, procure assistência médica imediatamente.
- **Olhos:** Lavar o rosto com água corrente em abundância por alguns minutos, sem esfregar e mantendo as pálpebras separadas, não administrar qualquer tipo de colírio ou outro medicamento sob o risco de cegueira, procurar atendimento médico.
- **Contato com a pele:** Lavar bem o local afetado com água corrente e caso persista a irritação procurar assistência médica.

3 – MEDIDAS DE COMBATE A INCÊNCIO:

Meios de extinção apropriados: Produto não é inflamável.

Fogo: Não há risco de incêndio.

Explosão: Não há risco de explosão.

4 – MANUSEIO E ESTOCAGEM:

Ao manusear, evite contato com os olhos e a pele e proteja as vias aéreas. Evite a inalação ou ingestão. Usar os EPIs e manter o local de trabalho bem arejado.

Os locais para estocagem devem permanecer secos, limpos, cobertos e sem goteiras e estrados de madeira para evitar contato da carga com o chão.

5 – PROTEÇÃO INDIVIDUAL:

- **Proteção respiratória:** Uso de respirador semifacial tipo “PFF2”;
- **Proteção dos olhos:** Uso de óculos de Proteção tipo “AMPLA VISÃO”;
- **Proteção das mãos:** Adoção do uso de creme protetor e luva nitrílica;
- **Proteção do corpo:** Uso de calça, camisa ou camiseta manga longa, sem punhos e gola muito apertados, calçado fechado ou bota de PVC;
- **Medidas de higiene:** São aconselháveis o banho e a troca das roupas, logo depois de concluído os trabalhos com o produto.

6 – INFORMAÇÕES ECOLÓGICAS:

- Material com propriedades alcalinas.
- Em grande quantidade, pode contaminar a fauna e a flora.

7 – TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO:

Produtos, resíduos e embalagens: As embalagens deverão ser enviadas para reciclagem ou aterro sanitário. Disposição conforme legislação local vigente.

8 – MEDIDAS DE CONTROLE PARA VAZAMENTOS OU DERRAMAMENTOS (PRECAUÇÕES PESSOAIS)

Remoção de fontes de ignição: Produto não inflamável.

Controle de poeira: Evitar a formação de poeira/ névoa do produto.

Prevenção da inalação e do contato com a pele, mucosa e olhos: Usar máscara de proteção respiratória PFF2 e óculos de segurança.

Precauções para o meio ambiente: Evitar que o produto atinja cursos d'água e o solo.

Métodos para limpeza: Recolher o produto com o auxílio de uma pá em vasilhame fechado para evitar a formação de poeira.

9 – INFORMAÇÕES SOBRE TRANSPORTES

Produto não enquadrado como perigoso para transporte conforme o Ministério dos Transportes.

Validade: 01 ano após data de fabricação se estocado em local seco, arejado e em temperatura ambiente.

Riscos à saúde: Produto tóxico. Em caso de exposição contínua recomenda-se o uso de máscara protetora. A exposição sem uso de EPI por tempo prolongado (> 15 anos) pode ocasionar problemas nas vias respiratórias. Há risco de silicose e é isento de amianto (asbesto). Em contato com a pele é irritante como qualquer poeira.

Riscos ao meio ambiente: O produto não oferece riscos ao meio ambiente. Em caso de derramamento o material deve ser coletado e disposto em local para resíduos classe III. Conforme NBR 10.004. (Produto não inflamável). Em solução aquosa tem ação alcalina. Reage no contato com ácidos. Estável em condições normais, acima de 650 ° C pode ocorrer decomposição térmica com desprendimento de CO₂.

Obs.: O processamento do minério é realizado com o objetivo de garantir as características aqui publicadas. Os valores apresentados são a média e o valor após o sinal $\pm$ é o desvio padrão. Em caso de dúvidas solicite ao departamento técnico, informações sobre os minérios industriais mais adequados a sua aplicação industrial – e-mail: marketing@saojudas.com.br - Fone/Fax: (15)3531-8103.

KOTO, B. K. A. The effect of repeated loading on the ultimate unconfined compressive strength of a lime-stabilized laterite. **Engineering Geology**, v. 23, n. 2, p. 125-135, 1986.

ANEXO B

Teste de Grubbs para RCS sem imersão

As tabelas a seguir apresentam os resultados da identificação de *outliers* para o ensaio de RCS sem imersão.

Tabela B.1 - Misturas LG'+CH-I

Condição	Dias de cura	RCS [kPa]	RCSmédio [kPa]	Desvio padrão	G	RCSmédio definitivo [kPa]
LG'	0	370	375	18	0,28	375
		395			1,11	
		360			0,83	
LG' + 5%	0	365	378	12	1,15	385
		385			0,58	
		385			0,58	
	2	500	493	8	0,87	493
		485			1,09	
		495			0,22	
	7	560	620	52	1,15	650
		650			0,58	
		650			0,58	
	14	929	924	28	0,18	924
		949			0,90	
		894			1,08	
LG' + 7,5%	0	295	288	6	1,15	285
		285			0,58	
		285			0,58	
	2	575	582	6	1,15	585
		585			0,58	
		585			0,58	
	7	964	944	44	0,46	969
		974			0,69	
		894			1,15	
	14	1164	1151	13	1,06	1151
		1149			0,13	
		1139			0,93	
LG' + 10%	0	340	335	18	0,28	335
		350			0,83	
		315			1,11	
	2	899	902	10	0,32	902
		894			0,80	

		914		1,12	
		1329		0,14	
7		1234	1346	121	0,92
		1474			1,06
		1554			0,92
14		1439	1501	58	1,06
		1509			0,14

Tabela B.2 - Misturas LG'+CH-III

Condição	Dias de cura	RCS [kPa]	RCSmédio [kPa]	Desvio padrão	G	RCSmédio definitivo [kPa]
LG'	0	370			0,28	
		395	375	18	1,11	375
		360			0,83	
LG' + 5%	0	328			0,83	
		330	331	4	0,28	331
		335			1,11	
	2	360			0,00	
		348	360	12	1,00	360
		372			1,00	
	7	605			0,73	
		575	593	16	1,14	593
		600			0,41	
	14	774			0,42	
		789	752	51	0,72	752
		694			1,14	
LG' + 7,5%	0	305			1,00	
		295	300	5	1,00	300
		300			0,00	
	2	335			1,07	
		340	339	4	0,16	339
		343			0,91	
	7	669			0,76	
		620	649	26	1,13	649
		659			0,37	
	14	799			0,22	
		749	791	38	1,09	791
		824			0,87	
LG' + 10%	0	360			0,22	
		350	358	8	1,09	358
		365			0,87	
	2	500	478	19	1,14	478

	465			0,70	
	470			0,44	
	899			0,27	
7	924	887	44	0,84	887
	839			1,11	
	954			1,11	
14	1044	1026	64	0,28	1026
	1079			0,83	

Tabela B.3 - Misturas NG'+CH-I

Condição	Dias de cura	RCS [kPa]	RCSmédio [kPa]	Desvio padrão	G	RCSmédio definitivo [kPa]
NG'	0	600			1,12	
		615	612	10	0,32	612
		620			0,80	
NG' + 5%	0	160			1,15	
		165	163	3	0,58	165
		165			0,58	
	2	350			1,10	
		340	344	5	0,84	344
		343			0,26	
	7	375			0,94	
		435	403	30	1,05	403
		400			0,11	
	14	515			1,11	
		595	578	57	0,29	578
		625			0,82	
NG' + 7,5%	0	230			0,00	
		240	230	10	1,00	230
		220			1,00	
	2	879			1,14	
		909	901	19	0,44	901
		914			0,70	
	7	1039			0,58	
		1184	1087	84	1,15	1039
		1039			0,58	
	14	1284			0,21	
		1439	1309	119	1,09	1309
		1204			0,88	
NG' + 10%	0	280			0,58	
		280	278	3	0,58	280
		275			1,15	

		1219			0,00	
2		1224	1219	5	1,00	1219
		1214			1,00	
		1579			0,74	
7		1599	1622	59	0,40	1622
		1689			1,14	
		2208			1,01	
14		2138	2140	68	0,02	2140
		2073			0,99	

Tabela B.4 - Misturas NG'+CH-III

Condição	Dias de cura	RCS [kPa]	RCSmédio [kPa]	Desvio padrão	G	RCSmédio definitivo [kPa]
NG'	0	600			1,12	
		615	612	10	0,32	612
		620			0,80	
NG' + 5%	0	195			1,15	
		190	192	3	0,58	190
		190			0,58	
	2	235			0,58	
		235	237	3	0,58	235
		240			1,15	
	7	270			0,41	
		265	277	16	0,73	277
		295			1,14	
	14	425			0,58	
		425	418	12	0,58	425
		405			1,15	
NG' + 7,5%	0	210			1,15	
		205	207	3	0,58	205
		205			0,58	
	2	470			1,15	
		485	480	9	0,58	485
		485			0,58	
	7	560			1,07	
		555	556	4	0,16	556
		552			0,91	
	14	904			0,24	
		899	906	8	0,86	906
		915			1,10	
NG' + 10%	0	175			0,58	
		175	177	3	0,58	175

	180			1,15	
	739			1,13	
2	744	742	3	0,76	742
	743			0,38	
	729			1,00	
7	754	754	25	0,00	754
	779			1,00	
	954			0,06	
14	1004	951	55	0,97	951
	894			1,03	

ANEXO C

Teste de Grubbs para RCS após imersão

As tabelas a seguir apresentam os resultados da identificação de *outliers* para o ensaio de RCS após imersão.

Tabela C.1 - Misturas LG'+CH-I

Condição	Dias de cura	RCS [kPa]	RCSmédio [kPa]	Desvio padrão	G	RCSmédio definitivo [kPa]
LG'	0	0			-	
		0	0	0	-	0
		0			-	
LG' + 5%	0	0			-	
		0	0	0	-	0
		0			-	
	2	55			1,14	
		105	92	32	0,41	92
		115			0,73	
	7	155			1,00	
		165	165	10	0,00	165
		175			1,00	
	14	160			1,15	
		180	173	12	0,58	180
		180			0,58	
LG' + 7,5%	0	0			-	
		0	0	0	-	0
		0			-	
	2	120			1,12	
		175	163	39	0,30	163
		195			0,82	
	7	300			0,93	
		290	288	13	0,13	288
		275			1,06	
	14	295			0,58	
		295	302	12	0,58	295
		315			1,15	
LG' + 10%	0	0			-	
		0	0	0	-	0
		0			-	
	2	375	383	8	1,09	383
		390			0,87	

		385			0,22
		485			0,80
7		505	493	10	1,12
		490			0,32
		550			1,09
14		520	533	15	0,87
		530			0,22

Tabela C.2 - Misturas LG'+CH-III

Condição	Dias de cura	RCS [kPa]	RCSmédio [kPa]	Desvio padrão	G	RCSmédio definitivo [kPa]
LG'	0	0			-	
		0	0	0	-	0
		0			-	
LG' + 5%	0	0			-	
		0	0	0	-	0
		0			-	
	2	0			-	
		0	0	0	-	0
		0			-	
	7	45			0,93	
		40	43	3	1,06	43
		43			0,13	
LG' + 7,5%	14	70			1,12	
		55	58	10	0,32	58
		50			0,80	
	0	0			-	
		0	0	0	-	0
		0			-	
	2	55			0,13	
		70	57	13	1,06	57
		45			0,93	
LG' + 10%	7	110			0,00	
		100	110	10	1,00	110
		120			1,00	
	14	125			1,09	
		135	133	8	0,22	133
		140			0,87	
LG' + 10%	0	0			-	
		0	0	0	-	0
		0			-	
	2	185	175	9	1,15	170

	170			0,58	
	170			0,58	
	220			1,09	
7	210	212	8	0,22	212
	205			0,87	
	275			0,00	
14	290	275	15	1,00	275
	260			1,00	

Tabela C.3 - Misturas NG'+CH-I

Condição	Dias de cura	RCS [kPa]	RCSmédio [kPa]	Desvio padrão	G	RCSmédio definitivo [kPa]
NG'	0	0			-	
		0	0	0	-	0
		0			-	
NG' + 5%	0	0			-	
		0	0	0	-	0
		0			-	
	2	105			0,58	
		105	107	3	0,58	105
		110			1,15	
	7	165			0,58	
		165	163	3	0,58	165
		160			1,15	
	14	235			0,93	
		210	223	13	1,06	223
		225			0,13	
NG' + 7,5%	0	0			-	
		0	0	0	-	0
		0			-	
	2	565			0,58	
		575	568	6	1,15	565
		565			0,58	
	7	849			1,13	
		814	822	24	0,35	822
		804			0,78	
	14	959			0,38	
		964	954	13	0,76	954
		939			1,13	
NG' + 10%	0	0			-	
		0	0	0	-	0
		0			-	

		884			1,12	
	2	869	872	10	0,32	872
		864			0,80	
		1124			0,87	
	7	1149	1157	38	0,22	1157
		1199			1,09	
		1334			0,43	
	14	1314	1364	70	0,71	1364
		1444			1,14	

Tabela C.4 - Misturas NG'+CH-III

Condição	Dias de cura	RCS [kPa]	RCSmédio [kPa]	Desvio padrão	G	RCSmédio definitivo [kPa]
NG'	0	0			-	
		0	0	0	-	0
		0			-	
NG' + 5%	0	0			-	
		0	0	0	-	0
		0			-	
	2	0			-	
		0	0	0	-	0
		0			-	
	7	50			1,09	
		65	58	8	0,87	58
		60			0,22	
NG' + 7,5%	14	60			1,15	
		70	67	6	0,58	70
		70			0,58	
	0	0			-	
		0	0	0	-	0
		0			-	
	2	215			1,15	
		210	212	3	0,58	210
		210			0,58	
NG' + 10%	7	295			0,58	
		295	297	3	0,58	295
		300			1,15	
	14	310			1,06	
		325	323	13	0,13	323
		335			0,93	
	0	0			-	
		0	0	0	-	0

	0			-	
	425			0,58	
2	425	422	6	0,58	425
	415			1,15	
	510			1,09	
7	520	518	8	0,22	518
	525			0,87	
	625			0,38	
14	605	620	13	1,13	620
	630			0,76	

ANEXO D

Modelos de módulo de resiliência

As tabelas a seguir apresentam as constantes e os coeficientes de determinação dos modelos calibrados.

Tabela D.1 - Modelos de Módulo de Resiliência - LG' + CHI

Condição	Dias de cura	Modelo	k1	k2	k3	R ²
LG'	0	Função de σd	156,031	0,267	-	0,56
		Função de $\sigma 3$	101,031	0,298	-	0,47
		Modelo Composto	152,056	0,398	-0,291	0,91
		Modelo Universal	2991,054	0,475	-1,023	0,89
LG' + 5%	0	Função de σd	723,053	-0,212	-	0,55
		Função de $\sigma 3$	312,095	0,201	-	0,61
		Modelo Composto	201,076	0,178	-0,251	0,90
		Modelo Universal	4312,984	0,387	-1,763	0,87
	2	Função de σd	1831,034	-0,333	-	0,86
		Função de $\sigma 3$	661,073	-0,256	-	0,64
		Modelo Composto	1606,765	-0,187	-0,302	0,96
		Modelo Universal	5461,941	-0,031	-1,562	0,96
	7	Função de σd	1743,756	-0,275	-	0,79
		Função de $\sigma 3$	1668,489	-0,299	-	0,67
		Modelo Composto	2079,596	-0,138	-0,192	0,87
		Modelo Universal	7307,540	-0,177	-0,533	0,89
	14	Função de σd	146638,355	-1,095	-	0,83
		Função de $\sigma 3$	36183,733	-0,841	-	0,70
		Modelo Composto	51823,967	-0,423	-0,77	0,93
		Modelo Universal	40476,434	-0,761	-1,342	0,91
LG' + 7,5%	0	Função de σd	541,026	-0,356	-	0,49
		Função de $\sigma 3$	571,982	0,276	-	0,13
		Modelo Composto	142,086	0,287	-0,211	0,91
		Modelo Universal	5371,651	0,275	-1,561	0,82
	2	Função de σd	2139,850	-0,253	-	0,54
		Função de $\sigma 3$	761,831	-0,312	-	0,29
		Modelo Composto	1765,045	-0,253	-0,194	0,90
		Modelo Universal	7613,283	-0,254	-1,641	0,90
	7	Função de σd	16925,144	-0,694	-	0,87
		Função de $\sigma 3$	3475,848	-0,390	-	0,51
		Modelo Composto	1901,038	0,042	-0,2	0,86
		Modelo Universal	16206,123	-0,295	-1,299	0,96
	14	Função de σd	1297,095	-0,160	-	0,84

		Função de σ_3	972,820	-0,108	-	0,44
		Modelo Composto	4433,834	-0,091	-0,250	0,87
		Modelo Universal	7683,544	0,029	-0,606	0,82
LG' + 10%	0	Função de σ_d	631,048	-0,293	-	0,57
		Função de σ_3	873,931	0,187	-	0,49
		Modelo Composto	99,010	0,301	-0,178	0,97
		Modelo Universal	6713,931	0,267	-1,637	0,91
	2	Função de σ_d	4125,931	-0,178	-	0,71
		Função de σ_3	513,012	-0,421	-	0,36
		Modelo Composto	6011,932	-0,123	-0,499	0,94
		Modelo Universal	11831,931	-0,381	-1,531	0,85
	7	Função de σ_d	4169,213	-0,321	-	0,85
		Função de σ_3	3260,103	-0,289	-	0,68
		Modelo Composto	20912,459	-0,184	-0,570	0,96
		Modelo Universal	14778,932	-0,217	-0,473	0,84
	14	Função de σ_d	13534,284	-0,529	-	0,75
		Função de σ_3	4455,367	-0,281	-	0,39
		Modelo Composto	13594,281	-0,041	-0,49	0,75
		Modelo Universal	24618,471	-0,211	-1,218	0,62

Tabela D.2 - Modelos de Módulo de Resiliência - LG' + CHIII

Condição	Dias de cura	Modelo	k1	k2	k3	R ²
LG'	0	Função de σ_d	156,031	0,267	-	0,56
		Função de σ_3	101,031	0,298	-	0,47
		Modelo Composto	152,056	0,398	-0,291	0,91
		Modelo Universal	2991,054	0,475	-1,023	0,89
LG' + 5%	0	Função de σ_d	917,263	-0,276	-	0,62
		Função de σ_3	265,965	0,163	-	0,43
		Modelo Composto	101,030	0,361	-0,286	0,95
		Modelo Universal	3399,981	0,439	-1,541	0,91
	2	Função de σ_d	1415,959	-0,389	-	0,97
		Função de σ_3	484,907	-0,163	-	0,27
		Modelo Composto	1420,738	-0,003	-0,3873	0,97
		Modelo Universal	3709,691	-0,026	-1,062	0,97
	7	Função de σ_d	1610,632	-0,373	-	0,93
		Função de σ_3	827,238	-0,223	-	0,68
		Modelo Composto	2174,045	0,001	-0,4471	0,97
		Modelo Universal	4828,363	-0,134	-0,867	0,97
	14	Função de σ_d	2174,875	-0,446	-	0,97
		Função de σ_3	652,638	-0,209	-	0,38
		Modelo Composto	1581,994	-0,071	-0,300	0,97

LG' + 7,5%	0	Modelo Universal	4569,966	-0,050	-1,116	0,97
		Função de σd	861,043	-0,201	-	0,41
		Função de $\sigma 3$	341,043	0,143	-	0,21
		Modelo Composto	99,569	0,275	-0,319	0,89
	2	Modelo Universal	2895,014	0,411	-1,712	0,88
		Função de σd	2475,529	-0,498	-	0,96
		Função de $\sigma 3$	730,592	-0,250	-	0,52
		Modelo Composto	2457,961	-0,012	-0,4857	0,96
	7	Modelo Universal	4694,907	-0,092	-1,336	0,95
		Função de σd	1603,121	-0,377	-	0,96
		Função de $\sigma 3$	724,682	-0,218	-	0,59
		Modelo Composto	1592,099	0,001	-0,340	0,97
	14	Modelo Universal	4524,430	-0,084	-0,935	0,97
		Função de σd	9962,816	-0,682	-	0,94
		Função de $\sigma 3$	648,081	-0,058	-	0,01
		Modelo Composto	6985,793	0,133	-0,7285	0,98
LG' + 10%	0	Modelo Universal	10255,767	0,293	-2,935	0,96
		Função de σd	749,981	-0,301	-	0,63
		Função de $\sigma 3$	412,020	0,167	-	0,18
		Modelo Composto	141,123	0,291	-0,346	0,94
	2	Modelo Universal	4331,075	0,312	-1,765	0,94
		Função de σd	2720,529	-0,367	-	0,82
		Função de $\sigma 3$	2704,172	-0,409	-	0,76
		Modelo Composto	134,795	0,075	0,3179	0,91
	7	Modelo Universal	7204,788	-0,576	0,526	0,85
		Função de σd	2099,806	-0,315	-	0,95
		Função de $\sigma 3$	1058,723	-0,171	-	0,38
		Modelo Composto	2144,854	-0,021	-0,301	0,95
	14	Modelo Universal	7696,119	-0,058	-0,987	0,94
		Função de σd	146,349	0,442	-	0,86
		Função de $\sigma 3$	251,629	0,330	-	0,55
		Modelo Composto	3100,081	-0,278	-0,1487	0,89
		Modelo Universal	5561,081	0,246	1,081	0,90

Tabela D.3 – Modelos de Módulo de Resiliência – NG' + CHI

Condição	Dias de cura	Modelo	k1	k2	k3	R ²
NG'	0	Função de σd	102,012	0,002	-	0,46
		Função de $\sigma 3$	93024,000	0,256	-	0,55
		Modelo Composto	285,045	0,284	-0,301	0,92
		Modelo Universal	1432,021	0,273	-1,104	0,84

NG' + 5%	0	Função de σd	352,102	-0,331	-	0,51
		Função de $\sigma 3$	421,000	-0,275	-	0,47
		Modelo Composto	221,641	0,195	-0,332	0,93
		Modelo Universal	2361,031	-0,041	-1,061	0,83
	2	Função de σd	487,207	-0,300	-	0,90
		Função de $\sigma 3$	192,333	-0,098	-	0,13
		Modelo Composto	451,897	0,050	-0,33	0,93
		Modelo Universal	1803,020	0,029	-1,056	0,89
	7	Função de σd	1051,231	-0,383	-	0,89
		Função de $\sigma 3$	757,135	-0,340	-	0,60
		Modelo Composto	1050,473	0,001	-0,383	0,89
		Modelo Universal	2965,193	-0,228	-0,599	0,79
	14	Função de σd	760,948	-0,260	-	0,90
		Função de $\sigma 3$	560,338	-0,220	-	0,60
		Modelo Composto	759,166	0,006	-0,26	0,90
		Modelo Universal	3177,551	-0,053	-0,665	0,84
NG' + 7,5%	0	Função de σd	373,024	-0,299	-	0,64
		Função de $\sigma 3$	443,013	-0,311	-	0,16
		Modelo Composto	501,034	0,041	-0,31	0,97
		Modelo Universal	3981,031	-0,365	-0,471	0,90
	2	Função de σd	307,183	0,182	-	0,78
		Função de $\sigma 3$	170,458	0,329	-	0,55
		Modelo Composto	152,138	0,307	0,046	0,86
		Modelo Universal	4824,557	0,479	-0,507	0,82
	7	Função de σd	4146,894	-0,300	-	0,77
		Função de $\sigma 3$	5325,759	-0,372	-	0,90
		Modelo Composto	5831,312	-0,263	-0,123	0,96
		Modelo Universal	16498,546	-0,397	0,044	0,96
	14	Função de σd	9496,198	-0,416	-	0,81
		Função de $\sigma 3$	8276,260	-0,412	-	0,65
		Modelo Composto	8550,556	-0,161	-0,28	0,93
		Modelo Universal	25233,870	-0,383	-0,393	0,83
NG' + 10%	0	Função de σd	4351,164	-0,351	-	0,42
		Função de $\sigma 3$	315,075	-0,258	-	0,34
		Modelo Composto	273,071	0,275	-0,35	0,95
		Modelo Universal	18371,011	-0,375	-0,173	0,87
	2	Função de σd	7396,974	-0,401	-	0,48
		Função de $\sigma 3$	5283,635	-0,341	-	0,41
		Modelo Composto	1657,212	-0,061	0,036	0,61
		Modelo Universal	19833,333	-0,349	-0,255	0,50
	7	Função de σd	1668,918	-0,021	-	0,04
		Função de $\sigma 3$	1848,748	-0,048	-	0,53
		Modelo Composto	4201,750	0,599	-0,6	0,70

	Modelo Universal	15264,722	-0,080	0,179	0,57
	Função de σd	6551,696	-0,197	-	0,14
	Função de $\sigma 3$	1457,050	0,149	-	0,07
14	Modelo Composto	11935,208	-0,177	-0,3	0,87
	Modelo Universal	31850,657	0,788	-2,491	0,65

Tabela D.4 - Modelos de Módulo de Resiliência - NG' + CHII

Condição	Dias de cura	Modelo	k1	k2	k3	R ²
NG'	0	Função de σd	102,012	0,002	-	0,46
		Função de $\sigma 3$	93024,000	0,256	-	0,55
		Modelo Composto	285,045	0,284	-0,301	0,92
		Modelo Universal	1432,021	0,273	-1,104	0,84
NG' + 5%	0	Função de σd	325,042	-0,308	-	0,59
		Função de $\sigma 3$	130,613	-0,112	-	0,07
		Modelo Composto	233,076	0,371	-0,5702	0,88
		Modelo Universal	1241,486	0,241	-1,673	0,52
	2	Função de σd	561,481	-0,387	-	0,84
		Função de $\sigma 3$	262,260	-0,241	-	0,32
		Modelo Composto	504,987	0,160	-0,509	0,89
		Modelo Universal	1564,137	-0,072	-1,018	0,62
	7	Função de σd	485,966	-0,314	-	0,72
		Função de $\sigma 3$	220,163	-0,152	-	0,18
		Modelo Composto	745,743	-0,016	-0,3873	0,96
		Modelo Universal	1869,705	0,149	-1,551	0,66
	14	Função de σd	738,875	-0,400	-	0,96
		Função de $\sigma 3$	312,348	-0,224	-	0,44
		Modelo Composto	445,734	0,266	-0,536	0,91
		Modelo Universal	2070,015	-0,061	-1,253	0,94
NG' + 7,5%	0	Função de σd	478,654	-0,349	-	0,75
		Função de $\sigma 3$	203,497	-0,164	-	0,14
		Modelo Composto	345,800	0,348	-0,5961	0,99
		Modelo Universal	1819,029	0,300	-2,361	0,85
	2	Função de σd	1233,681	-0,379	-	0,95
		Função de $\sigma 3$	777,994	-0,302	-	0,60
		Modelo Composto	1228,982	0,007	-0,3842	0,95
		Modelo Universal	3702,714	-0,115	-0,987	0,91
	7	Função de σd	3019,660	-0,449	-	0,90
		Função de $\sigma 3$	1567,194	-0,332	-	0,51
		Modelo Composto	1390,427	0,258	-0,5085	0,90
		Modelo Universal	7360,121	-0,112	-1,291	0,94
	14	Função de σd	1615,191	-0,313	-	0,73

		Função de σ_3	752,407	-0,159	-	0,17
		Modelo Composto	3259,991	-0,075	-0,399	0,92
		Modelo Universal	6127,273	0,351	-1,976	0,92
0		Função de σ_d	516,273	-0,406	-	0,72
		Função de σ_3	86,203	0,000	-	0,00
		Modelo Composto	356,035	0,235	-0,5404	0,96
		Modelo Universal	1303,378	0,274	-1,996	0,90
2		Função de σ_d	20552,042	-0,751	-	0,77
		Função de σ_3	9218,807	-0,621	-	0,72
		Modelo Composto	8258,555	-0,236	-0,331	0,94
		Modelo Universal	18377,510	-0,532	-1,044	0,93
7		Função de σ_d	5360,721	-0,454	-	0,82
		Função de σ_3	4771,802	-0,452	-	0,65
		Modelo Composto	29930,589	-0,367	-0,4913	0,93
		Modelo Universal	13579,923	-0,421	-0,579	0,92
14		Função de σ_d	106284,595	-0,970	-	0,90
		Função de σ_3	23949,411	-0,721	-	0,57
		Modelo Composto	76832,640	0,037	-1,0021	0,90
		Modelo Universal	41161,551	-0,270	-2,229	0,82