

GISSELE SOUZA ROCHA

**EFEITO DA CAL NA RESPOSTA MECÂNICA DE UM SOLO RESIDUAL
MADURO: ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA,
PERMEABILIDADE, COMPRESSIBILIDADE E EFEITO DA CURA ACELERADA
NA RESISTÊNCIA MECÂNICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2018

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T

R672e
2018

Rocha, Gissele Souza, 1991-
Efeito da cal na resposta mecânica de um solo residual maduro : análise da resistência à compressão não confinada, permeabilidade, compressibilidade e efeito da cura acelerada na resistência mecânica / Gissele Souza Rocha. - Viçosa, MG, 2018. xiv, 73f. : il. (algumas color.); 29 cm.

Inclui anexo.

Orientador: Dario Cardoso de Lima.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 59-68.

1. Mecânica do solo. 2. Solos - Permeabilidade. 3. Solos - Compactação. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22 ed. 624.15136

GISSELE SOUZA ROCHA


**EFEITO DA CAL NA RESPOSTA MECÂNICA DE UM SOLO RESIDUAL
MADURO: ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA,
PERMEABILIDADE, COMPRESSIBILIDADE E EFEITO DA CURA ACELERADA
NA RESISTÊNCIA MECÂNICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

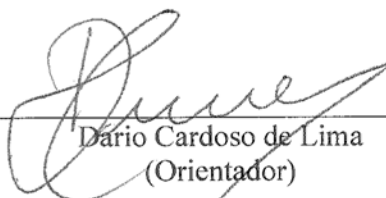
APROVADA: 20 de fevereiro de 2018.



Claudio Henrique de C. Silva
(Coorientador)



Roberto Lopes Ferraz



Dario Cardoso de Lima
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas oportunidades que tem me fornecido ao longo do caminho.

À minha família, em especial, minha mãe e irmã, pelo incentivo e fé depositados em mim. Espero poder corresponder de maneira satisfatória a tudo isto no futuro.

Ao Gustavo, meu companheiro e acima de tudo meu melhor amigo, por estar sempre ao meu lado me apoiando em todas as decisões. Sem o seu auxílio técnico e emocional, este trabalho teria sido muito mais difícil de ser realizado. Te amo!

Ao meu orientador, Dario Cardoso de Lima, pelos ensinamentos, dedicação a este trabalho e pelas inúmeras cartas de recomendação fornecidas. Sua forma de orientação foi decisiva na minha escolha de continuar estudando e me tornar uma doutora.

À Néia e ao Toninho pela grande amizade e por sempre me incentivarem a prosseguir na carreira acadêmica, desde a graduação na UFMG.

Aos professores do DEC, em especial, Eduardo Marques, Heraldo Pitanga, Cláudio Silva e Roberto Ferraz pelo ensino de qualidade fornecido.

À Cilene, Andressa e Leandro pela amizade e companheirismo durante todo o mestrado.

Aos funcionários do LEC, em especial, Anderson, Dedé e Marcelo por todo auxílio técnico e pela amizade.

À CAPES pela concessão de bolsa de estudo e ao CNPq pelo apoio financeiro através do auxílio número 305949/2014-4.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE ABREVIACOES	ix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Objetivos	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Considerações gerais.....	3
2.2 Solos tropicais.....	4
2.3 Estabilização ou melhoramento de solos	6
2.4 Estabilização dos solos com cal.....	7
2.4.1 A cal.....	8
2.4.2 Reações solo-cal	11
2.4.2.1 Trocas catiônicas e flocculação.....	12
2.4.2.2 Reações pozolânicas	13
2.4.2.3 Carbonatação	14
2.5 Resistência mecânica dos solos estabilizados com cal	15
2.6 Permeabilidade e compressibilidade dos solos estabilizados com cal.....	19
2.7 Ensaio de adensamento com velocidade constante de deformação.....	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 Materiais	25
3.2 Métodos.....	26

3.2.1	Preparação das amostras de solo	26
3.2.2	Preparação das misturas solo-cal.....	26
3.2.3	Caracterização geotécnica do solo e das misturas solo-cal.....	27
3.2.3.1	Ensaio de compactação das misturas solo-cal	28
3.2.3.2	Ensaio de compressão não confinada.....	28
3.2.3.3	Ensaio de permeabilidade	29
3.2.3.4	Ensaio de adensamento CRD.....	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1	Caracterização geotécnica do solo	33
4.2	Compactação do solo e das misturas solo-cal	34
4.3	Compressão não confinada.....	35
4.3.1	Ensaio com cura tradicional.....	35
4.3.2	Ensaio com cura acelerada.....	38
4.3.3	Deformação	41
4.4	Permeabilidade	46
4.5	Compressibilidade	50
5	CONCLUSÕES	56
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
	ANEXO A.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Perfil de alteração de solo típico constituído pela rocha sã, saprolito e solo, adaptada de DNIT (2006) e MITCHELL; SOGA (2005).....	5
Figura 2. Efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal, adaptada de INGLES; METCALF (1972).....	16
Figura 3. Resistência à compressão não confinada (q_u) versus relação vazios/cal (η/C_{av}) do SRAB-25% RBR- CAL (LOPES JUNIOR, 2011).....	17
Figura 4. Influência da temperatura e do tempo de cura na resistência à compressão não confinada das misturas solo-cal, adaptada de PINTO(1965).	18
Figura 5. Equipamento do ensaio de adensamento CRD, adaptada de RIBEIRO (1992).	23
Figura 6. Local de coleta do solo Latossolo Vermelho-Amarelo.....	25
Figura 7. Fluxograma do programa de ensaios de laboratório realizados.....	27
Figura 8. Corpos de prova dos ensaios de compressão não confinada.	29
Figura 9. Visão geral do sistema de percolação em coluna implementado por Caneschi (2012) em uso, com a realização simultânea de nove ensaios de permeabilidade.	30
Figura 10. Visão geral do equipamento utilizado no ensaio de adensamento CRD.....	32
Figura 11. Curva granulométrica do solo.....	33
Figura 12. Curvas do ensaio de compactação dinâmica realizado no solo e nas misturas solo-cal.	34
Figura 13. Cura tradicional das misturas solo-cal.	36
Figura 14. . Corpos de prova ensaiados com 3 dias de cura: (A) solo natural; (B) solo + 2% de cal; (C) solo + 4% de cal; e (D) solo + 6% de cal.....	37
Figura 15. Cura acelerada das misturas solo-cal no teor de 2% de cal.....	39
Figura 16. Cura acelerada das misturas solo-cal no teor de 4% de cal.....	39
Figura 17. Cura acelerada das misturas solo-cal no teor de 6% de cal.....	39
Figura 18. Curvas tensão-deformação para os ensaios de compressão não confinada em corpos de prova do solo natural e das misturas solo-cal com cura tradicional.....	43
Figura 19. Curvas tensão-deformação dos ensaios de compressão não confinada em corpos de prova das misturas solo-cal no teor de 2% de cal.	44

Figura 20. Curvas tensão-deformação dos ensaios de compressão não confinada em corpos de prova das misturas solo-cal no teor de 4% de cal.	44
Figura 21. Curvas tensão-deformação dos ensaios de compressão não confinada em corpos de prova das misturas solo-cal no teor de 6% de cal.	45
Figura 22. Coeficientes de permeabilidade do solo e das misturas solo-cal em função do período de cura.	47
Figura 23. Coeficientes de permeabilidade (k_{20}) em função do volume de poros das misturas solo-cal.	49
Figura 24. Volume de poros em função do período de cura das misturas solo-cal.	49
Figura 25. Corpos de prova do ensaio de adensamento CRD: (a) antes do ensaio; (b) após ensaio e (c) após secagem em estufa.....	50
Figura 26. Curvas de adensamento do solo e das misturas solo-cal: a, b,c e d para diferentes teores de cal; e, f, g e h para diferentes períodos de cura.....	51
Figura 27. Tensão de pré-adensamento obtida no ensaio de adensamento CRD.....	54
Figura 28. Índice de compressão do solo e das misturas solo-cal.	55
Figura 29. Índice de recompressão do solo e das misturas solo-cal.	55
Figura 30. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura tradicional no teor de 2% de cal.	69
Figura 31. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura tradicional no teor de 4% de cal.	69
Figura 32. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura tradicional no teor de 6% de cal.	69
Figura 33. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 2% de cal e na temperatura de cura de 10 °C.	70
Figura 34. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 2% de cal e na temperatura de cura de 30 °C.	70
Figura 35. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 2% de cal e na temperatura de cura de 40 °C.	70
Figura 36. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 2% de cal e na temperatura de cura de 50 °C.	71
Figura 37. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 4% de cal e na temperatura de cura de 10 °C.	71

Figura 38. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 4% de cal e na temperatura de cura de 30 °C.	71
Figura 39. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 4% de cal e na temperatura de cura de 40 °C.	72
Figura 40. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 4% de cal e na temperatura de cura de 50 °C.	72
Figura 41. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 6% de cal e na temperatura de cura de 10 °C.	72
Figura 42. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 6% de cal e na temperatura de cura de 30 °C.	73
Figura 43. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 6% de cal e na temperatura de cura de 40 °C.	73
Figura 44. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 6% de cal e na temperatura de cura de 50 °C.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição média das cales brasileiras.....	9
Tabela 2. Exigências químicas e físicas para comercialização das cales hidratadas.....	10
Tabela 3. Ensaio mecânicos e hidráulicos realizados.....	28
Tabela 4. Caracterização geotécnica do solo.....	33
Tabela 5. Parâmetros do ensaio de compactação realizado no solo e nas misturas solo-cal. ..	34
Tabela 6. Resultados da resistência à compressão não confinada de corpos de prova do solo natural e das misturas solo-cal com cura tradicional.....	36
Tabela 7. Resultados da resistência à compressão não confinada de corpos de prova do solo natural e das misturas solo-cal com cura acelerada.....	38
Tabela 8. Deformação axial na ruptura e desvio padrão de cada ensaio com cura tradicional.....	42
Tabela 9. Deformação axial na ruptura e desvio padrão de cada ensaio com cura acelerada. .	43
Tabela 10. Coeficiente de permeabilidade a 20 °C (k_{20}) e desvio padrão de cada ensaio.	46
Tabela 11. Parâmetros obtidos através do ensaio de adensamento CRD.....	53

LISTA DE ABREVIACÕES

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associao Brasileira de Normas Técnicas
ABPC	Associao Brasileira dos Produtores de Cal
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
B.O.D.	<i>Biochemical Oxygen Demand</i>
CH	Cal Hidratada
CBR	<i>Califórnia Bearing Ratio</i>
CNC	Compressão Não Confinada
CRD	<i>Constant Rate of Displacement</i>
CT	Cura Tradicional
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ICAL	Indústria de Calcinação
IP	ndice de Plasticidade
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MCT	Miniatura Compacta Tropical
MG	Minas Gerais

NBR	Norma Brasileira
SN	Solo Natural
SP	São Paulo
SRAB-25% RBR- CAL	Solo Residual de Arenito Botucatu-SP com 25% de Rocha Basáltica Pulverizada de Resíduo de Britagem, tratado com cal.
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
UFV	Universidade Federal de Viçosa
USC	<i>Unified Soil Classification</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
Ca	Cálcio
Ca ²⁺	Cálcio Divalente
C _{av}	Teor Volumétrico de Cal
C _c	Índice de Compressão
Cm	Centímetro
cm/s	Centímetro por Segundo
cm ²	Centímetro ao Quadrado
C _r	Índice de Recompressão
G	Gramma
H	Altura
H	Hora
H ₂ O	Água
K	Potássio
k ₂₀	Coefficiente de Permeabilidade a 20 °C
kgf/cm ²	Quilograma Força por Centímetro ao Quadrado
kPa	Quilopascal
l/Vca	Inverso do Volume de Cal
M	Metro
mca	Metro de Coluna de Água
ml	Mililitro
mm	Milímetro
Mg	Magnésio
Mg ²⁺	Magnésio Divalente
mm/min	Milímetro por Minuto
Na	Sódio
pH	Potencial Hidrogeniônico

σ'_{vm}	Tensão de Pré- Adensamento
σ_v	Tensão Vertical Total
σ'_v	Tensão Vertical Efetiva
u_b	Poropressão na Base
V_v	Volume de Vazios
w_{ot}	Teor de Umidade Ótimo
$\gamma_{d\ max}$	Peso Específico Aparente Seco Máximo
ϵ_a	Deformação Axial
$\epsilon_{a\ ruptura}$	Deformação Axial na Ruptura
$\rho_{d\ max}$	Massa Específica Aparente Seca Máxima
ρ_s	Massa Específica dos Grãos

RESUMO

ROCHA, Gissele Souza, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Efeito da cal na resposta mecânica de um solo residual maduro: análise da resistência à compressão não confinada, permeabilidade, compressibilidade e efeito da cura acelerada na resistência mecânica.** Orientador: Dario Cardoso de Lima. Coorientadores: Cláudio Henrique de Carvalho Silva, Ecidinéia Pinto Soares de Mendonça e Heraldo Nunes Pitanga.

O presente estudo aborda a aplicação das misturas solo-cal em projetos geotécnicos. No estudo, coletou-se uma amostra deformada de um solo residual maduro da Zona da Mata de Minas Gerais e realizou-se um programa de ensaios de laboratório que abrangeu: (i) ensaios de caracterização geotécnica, ensaios de compactação (Proctor normal), compressão não confinada, permeabilidade e adensamento com velocidade constante de deformação (CRD) em corpos de prova do solo; (ii) ensaios de compactação (Proctor normal) nas misturas solo-cal com 1, 2, 3, 4 e 6% de teor de cal em relação à massa de solo seco; (iii) ensaios de compressão não confinada com cura tradicional e de permeabilidade nas misturas solo-cal, nos teores de cal de 2, 4 e 6%, curados na temperatura de 22,8 °C e nos períodos de cura de 3, 7, 28 e 90 dias; (iv) ensaios de compressão não confinada com cura acelerada em corpos de prova das misturas solo-cal, nos teores de cal de 2, 4 e 6% em relação à massa de solo seco, curados nas temperaturas de 10, 30, 40 e 50°C, nos períodos de cura de 12, 24, 48 e 96 horas e (v) ensaios de adensamento CRD nos teores de 1, 2, 3 e 4% de cal, curados na temperatura de 22,8 °C e nos períodos de cura de 7, 28, 90 e 180 dias. Os resultados obtidos mostram que: (i) o aumento do teor de cal nas misturas produziu aumentos na umidade ótima e redução no peso específico aparente seco máximo do solo, assim como ganhos expressivos de resistência mecânica do solo que se relacionam diretamente com os períodos de cura; (ii) o aumento do teor de cal, combinado com o aumento do período e da temperatura de cura, produziu ganhos de resistência mecânica do solo que se relacionam diretamente com estes parâmetros; (iii) no processo de cura acelerada, o aumento da temperatura agilizou a ocorrência de reações pozolânicas, que aumentaram os valores de resistência mecânica em um menor período de cura; (iv) a permeabilidade das misturas solo-cal diminuiu com a ocorrência das reações pozolânicas ao longo dos períodos de cura e (v) as tensões de pré-adensamento aumentaram e os índices de vazios iniciais, de compressão e de recompressão diminuíram com o incremento dos teores de cal e períodos de cura, resultando em misturas solo-cal mais rígidas e menos compressíveis.

ABSTRACT

ROCHA, Gissele Souza, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Lime effect in the mechanical response of a mature residual soil: unconfined compression strength, permeability, compressibility and effects of accelerated curing in the mechanical strength.** Advisor: Dario Cardoso de Lima. Co-advisors: Cláudio Henrique de Carvalho Silva, Ecidinéia Pinto Soares de Mendonça and Heraldo Nunes Pitanga.

The current study addresses the application of soil-lime mixtures in the geotechnical design. In the research, a disturbed sample of a mature residue soil from Zona da Mata of Minas Gerais was collected, and a program of several laboratory testings were made, which involved: (i) geotechnical characterization, compaction (standard Proctor), unconfined compression, permeability and constant rate of displacement (CRD) tests in soil samples; (ii) compaction tests (standard Proctor compaction effort) in the lime-soil specimens with lime contents of 1, 2, 3, 4 and 6% in relation to the soil dry mass; (iii) unconfined compression and permeability tests in soil-lime mixtures specimens with lime contents of 2, 4 and 6% in relation to the soil dry mass, which were cured at the cure periods of 3, 7, 28 and 90 days under temperature of 22.8 °C; (iv) unconfined compression tests in the in lime-soil mixture specimens with lime contents of 2, 4 and 6% in relation to the soil dry mass, which were cured at cure periods of 12, 24, 48 and 96 hours under the temperatures of 10, 30, 40 and 50 °C; and (v) CRD tests in soil-lime mixtures specimens with lime contents of 1, 2, 3 and 4% in relation to the soil dry mass, which were cured at the cure periods of 7, 28, 90 and 180 days under temperature of 22.8 °C. The results showed that: (i) the increase of the lime content in the samples also resulted in increase of the optimum moisture content and decrease of the specific maximum dry weight of the soil, besides of expressive mechanical strength gains which were directly related to the curing periods; (ii) the increase of lime content, together with the increase of the curing temperature and period, resulted in mechanical strength gains which were directly related to these parameters; (iii) in the process of accelerated cure of the soil-lime mixtures, the temperature increase sped the occurrence of pozzolanic reactions, which increased the mechanical strength gains within a smaller cure period; (iv) the permeability of the mixtures reduced with the occurrence of the pozzolanic reactions throughout the cure periods; and (v) the pre-consolidation stress increased whereas the initial void ratio, compression and recompression indices reduced with the increment of lime content and cure period, resulting in more rigid and less compressible mixtures.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Em misturas solo-cal para aplicações rodoviárias, é comum se associar a melhoria na trabalhabilidade do solo às reações de troca catiônica com a consequente floculação-aglomeração das partículas finas, bem como o ganho de resistência mecânica à ocorrência de reações pozolânicas (LIMA, 1981).

Com relação ao ganho de resistência mecânica, vale citar o estudo de Eades e Grim (1966), em que os autores relacionaram os ganhos de resistência à compressão não confinada, ao teor de cal e à mineralogia do solo, assim como o trabalho de Mallela et. al. (2004), quando se estabeleceu que propriedades do solo, tais como pH, teor de matéria orgânica, quantidade de cátions de sódio trocáveis, ferro extraído, presença de carbonatos, grau de alteração, razões sílica-sesquióxido e sílica-alumina, dentre outros, afetam de forma significativa o ganho de resistência mecânica no decorrer do tempo.

Nesse campo, há uma lacuna apreciável a respeito do efeito da temperatura de cura no ganho de resistência mecânica de solos brasileiros, em especial de solos da Zona da Mata de Minas Gerais, podendo-se referir neste caso apenas ao estudo preliminar de Mendonça (1998), quando analisou o efeito da temperatura de cura na resistência ao cisalhamento de um solo residual maduro e de dois solos residuais jovens.

Quanto à permeabilidade, não há na literatura informação conclusiva sobre o efeito do teor de cal neste parâmetro, sendo comum se afirmar que a permeabilidade de um solo aumenta com a adição de cal, devido ao fenômeno das reações de troca catiônica com a consequente floculação-aglomeração de suas partículas mais finas. Nesse sentido, El-Rawi e Awad (1981), Nalbantoglu e Tuncer (2001), Singh et al. (2008), por exemplo, concluíram que a adição de cal aos solos promoveu aumentos da permeabilidade, contudo Milburn e Parsons (2004) e Alhassan (2008) determinaram quedas na permeabilidade para teores crescentes de cal.

No que se refere à compressibilidade, há poucos estudos dirigidos às misturas solo-cal, podendo-se referir, dentre outros, a Rajasekaran e Rao (2002), sobre a compressibilidade de uma argila marinha estabilizada com cal, De Brito Galvão et al. (2004), sobre os parâmetros de compactação de solos estabilizados com cal, Rao e Shivananda (2005), a respeito da

compressibilidade de uma mistura argila-cal e Singh et al. (2008) que estudaram a influência da cal nos parâmetros de consolidação de solos da Índia. Nesse tópico, nota-se que há carência significativa de estudos sobre a estabilização química de solos da Zona da Mata de Minas Gerais, podendo-se referir apenas ao estudo de Barbosa e Leroueil (1998), que analisaram também aspectos da compressibilidade de um solo residual jovem desta área com o emprego de amostras reconstituídas e melhoradas com cimento Portland.

Considerando-se que o uso de misturas solo-cal em obras de infraestrutura de transportes deve-se pautar no conhecimento adequado das suas propriedades de engenharia, a presente pesquisa aborda a caracterização geotécnica pertinente à resistência mecânica, permeabilidade e compressibilidade de um solo típico da Zona da Mata de Minas Gerais, Brasil, estabilizado com cal, tema este que se reveste de atualidade, pois vem preencher uma lacuna na pesquisa de solos estabilizados quimicamente no Estado de Minas Gerais.

1.2 Objetivos

O presente trabalho direcionou-se à caracterização tecnológica de misturas solo-cal produzidas a partir da adição de uma cal hidratada comercial a um solo residual maduro (Latossolo Vermelho-Amarelo) da Zona da Mata de Minas Gerais, com a análise da influência do teor de cal, período de cura e temperatura de cura no comportamento de engenharia das misturas, em termos de resistência mecânica, permeabilidade e compressibilidade.

Os objetivos específicos foram estabelecidos, como segue: (i) caracterização geotécnica do solo em estudo; (ii) caracterização geotécnica das misturas solo-cal preparadas com diferentes teores de cal e submetidas a diferentes períodos de cura, em termos de resistência à compressão não confinada, permeabilidade e compressibilidade determinada em ensaios de adensamento CRD (*Constant Rate of Displacement*); e (iii) caracterização geotécnica das misturas solo-cal preparadas com diferentes teores de cal e submetidas à cura acelerada sob a ação de várias temperaturas e períodos de cura, em termos de resistência à compressão não confinada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações gerais

O solo é recurso natural lentamente renovável, encontrado em diferentes posições na paisagem terrestre. Pinto (2006) destaca que a sua origem pode resultar do fenômeno da intemperização de rochas *in situ*, dando origem aos solos residuais, ou da deposição de partículas de rochas carregadas do seu local de origem pela ação de algum agente de transporte, com a formação dos solos sedimentares ou transportados.

Considerando esses vários aspectos, na Ciência do Solo, os solos podem ser definidos como corpos naturais que recobrem a superfície terrestre, constituídos por materiais minerais e orgânicos, que contêm organismos vivos e apresentam potencial para o desenvolvimento de vegetação, podendo também ser empregados em trabalhos de engenharia (EMBRAPA, 1999).

Por outro lado, em Mecânica dos Solos, os solos são materiais naturais da crosta terrestre com elementos sólidos que podem ser separados pela ação suave da água, enquanto que na construção civil e em estradas, consideram-se solos os materiais que podem ser escavados com equipamentos comuns, em contraposição às rochas, que requerem o emprego de explosivos para tal fim (NOGAMI, 1966).

Assim, os solos recebem designações diversas, conforme a área que o estuda. Na área de estradas, uma classificação adotada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes DNIT (2006) e, também, utilizada internacionalmente é a da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), que se fundamenta nas propriedades índices dos solos como, granulometria, limite de liquidez e índice de plasticidade, segundo terminologia de Vargas (1977).

Sob o prisma das aplicações em estradas, há que se diferenciar o comportamento geotécnico dos solos de regiões temperadas, ditos tradicionais, cujos comportamentos mecânicos têm sido abordados em textos clássicos de Mecânica dos Solos, daquele dos solos tropicais. Nogami (1966) enfatiza que ambos os materiais exibem propriedades de engenharia e comportamentos mecânicos diferenciados, sendo que os solos tropicais, em geral, não podem ser classificados de modo satisfatório com base nas suas propriedades índices tradicionais já referidas e requerem uma abordagem geotécnica diferenciada.

2.2 Solos tropicais

Segundo Ker (1997), a gênese de solos, notadamente os tropicais, está normalmente associada a um processo de intemperismo intenso que produz remoção de sílica e acúmulo de alumínio. A mineralogia destes solos é normalmente composta por minerais como quartzo, goethita, hematita, caulinita, gibbsita e outros como a ilmenita e magnetita.

Dependendo do material de origem, intensidade do intemperismo e drenagem do sistema, prevalecem em solos bastantes intemperizados, o quartzo, na sua fração grossa (areia e silte), a caulinita e os óxidos de ferro e alumínio (goethita, hematita e gibbsita), na sua fração argila. De maneira geral, pode-se dizer que durante o intemperismo ocorre a liberação de sílica, alumínio, ferro e íons diversos como cálcio, magnésio, sódio e potássio (Ca, Mg, Na e K). Considerando as respectivas solubilidades destes minerais, os últimos (de maior solubilidade) tendem a ser os primeiros lixiviados do sistema, seguidos da sílica (menos solúvel, porém mais do que o ferro e o alumínio), restando o alumínio que precipita como gibbsita (ROQUE, 2013).

A definição de solo tropical assumida por Nogami e Villibor (1995) se refere ao material que apresenta propriedades e comportamentos decorrentes de processos geológicos e/ou pedológicos típicos de regiões tropicais úmidas. Segundo esses autores, dentre os solos tropicais, pode-se referir aos solos lateríticos e aos solos saprolíticos, como segue: (i) pedologicamente, solos lateríticos são solos superficiais típicos das partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas, resultantes da transformação da parte superior do subsolo pela atuação do intemperismo; e (ii) solos saprolíticos são solos genuinamente residuais, que resultam da decomposição e/ou desagregação "in situ" da rocha, mantendo nitidamente a estrutura do material que lhe deu origem.

Refere-se que o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006) subdivide o solo residual em jovem e maduro, em função do grau de alteração de seus minerais, não tendo o uso dos termos maduro e jovem relação direta com a idade geológica de cada camada.

Segundo Roque (2013), os solos residuais jovens são materiais com texturas areno-siltosas, pouco coesivos, com baixa plasticidade e com alta susceptibilidade à erosão, que ocorrem sobrejacentes aos saprolitos e subjacente aos solos residuais maduros, raramente aflorando. Entretanto, comumente aparecem em cortes de estradas, paredes de voçorocas e em

locais com maior declividade, sua espessura média varia entre 5 a 7 m, também podendo ocorrer espessuras superiores a 20 m em alguns locais.

Já os solos residuais maduros, de interesse maior nesta pesquisa, apresentam granulometria fina, com texturas argilo-silto-arenosas a areno-silto-argilosas, plasticidade média a alta e pouca susceptibilidade à erosão. Suas espessuras médias, entre 3 a 6 m, variam em função da posição topográfica, sua coloração varia de marrom a marrom avermelhada. De acordo com Roque (2013) esse tipo de solo é o que predomina na maior parte da região da Zona da Mata de Minas Gerais.

Na Figura 1, tem-se a caracterização do perfil de solo quanto ao seu grau de intemperismo, dividindo-o em seis camadas, segundo Mitchell e Soga (2005), e também em cinco camadas, com base nas considerações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006).

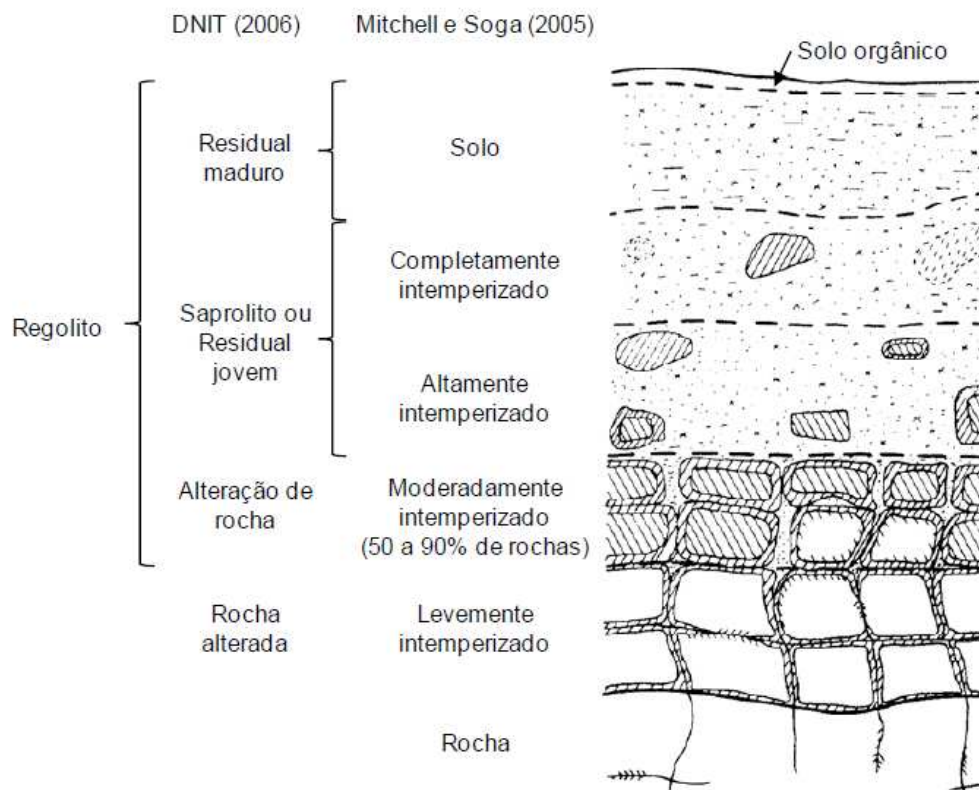


Figura 1. Perfil de alteração de solo típico constituído pela rocha sã, saprolito e solo, adaptada de DNIT (2006) e MITCHELL; SOGA (2005).

2.3 Estabilização ou melhoramento de solos

A estabilização ou melhoramento consiste na alteração de propriedades geotécnicas dos solos, tais como resistência mecânica, permeabilidade, compressibilidade e durabilidade, tornando-os capazes de responderem de forma satisfatória às solicitações previstas nos projetos de engenharia (LIMA, 1981).

De acordo com Guimarães (2002), comumente a estabilização de solos para fins rodoviários pode ser obtida por várias técnicas, que são reunidas em dois grandes grupos:

- as que empregam meios mecânicos: correção da granulometria e da plasticidade através da incorporação ou retirada de determinadas quantidades de frações constituintes do solo, até a obtenção de parâmetros estabelecidos por normas; e
- as que empregam meios químicos: utilização de aditivos orgânicos ou inorgânicos, como a cal, o cimento Portland, silicatos de sódio, materiais betuminosos, resinas, compostos de fósforo e outros.

Guimarães (2002) considera que a opção por um ou outro método de estabilização, seja ele mecânico ou com a inserção de aditivos químicos, é influenciada por uma série de fatores, entre os quais se destacam os econômicos, a própria finalidade da obra, as características dos materiais e as propriedades do solo que devem ser corrigidas.

Outro processo de melhoramento de solos muito utilizado desde a antiguidade é o da compactação. Basheer (2001) refere que Ralph R. Proctor, em 1933, nos Estados Unidos da América, publicou suas observações sobre a compactação de aterros em solos, contribuindo de maneira significativa para o desenvolvimento desta técnica ao apresentar a relação entre o peso específico aparente seco e o teor de umidade, para uma dada energia de compactação. Atualmente, são utilizados vários métodos de compactação em laboratórios geotécnicos, procurando se aproximar das condições encontradas em campo e buscando reduzir o tempo de compactação de corpos-de-prova. O método utilizado nesta pesquisa é o de Proctor (compactação dinâmica), que no Brasil foi normatizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2016e) e pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1994).

Dentre os tipos de estabilização apresentados, nesta pesquisa, será tratada a estabilização química, com foco na avaliação do efeito da cal na resistência mecânica, permeabilidade e compressibilidade de um solo residual maduro.

2.4 Estabilização dos solos com cal

A estabilização química dos solos é uma prática técnico-constructiva consagrada internacionalmente para a construção de rodovias. Dentre os produtos comumente utilizados para este fim, podem-se citar o cimento Portland e a cal hidratada, devido à sua grande diversidade.

O uso da cal como aditivo no tratamento de solos é um dos mais antigos métodos de estabilização química conhecidos, tendo sido utilizado nas mais variadas aplicações. A cal interage com as partículas amorfas de argila por meio de reações endotérmicas, promovendo uma série de transformações de natureza físico-química, que resultam em maior capacidade de suporte e maior estabilidade da mistura face à ação da água (CRISTELO, 2001).

A experiência rodoviária brasileira com misturas solo-cal data da década de 60 do século passado, inicialmente ao nível de pesquisa, podendo-se referir aos trabalhos de: (i) Pinto (1964), em que se relata a estabilização de um solo A-7-5 com pequenas quantidades de cal e se apresenta um conjunto de resultados de ensaios de resistência à compressão não confinada e CBR; (ii) Pinto (1965), onde se destaca o resultado de um estudo mais abrangente, englobando um universo de oito solos e sete cales comerciais; e (iii) Batista (1969), onde se apresenta o resultado de um estudo dirigido à análise da influência da cal na granulometria, plasticidade e resistência mecânica de solos do estado do Rio de Janeiro. Atualmente, o DNIT (2006) enfatiza o uso de “misturas solo-cal” com teores de cal hidratada de 5 a 6%, para aquelas empregadas como camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários com acentuada rigidez à flexão, enquadrando-as na classificação de misturas semirrígidas, bem como se refere ao “solo melhorado com cal”, quando não ocorrem ganhos acentuados de resistência mecânica, enquadrando as misturas na categoria de flexíveis.

Para Cristelo (2001), historicamente, a principal aplicação do método de estabilização de solos com cal tem sido em obras rodoviárias, nomeadamente no melhoramento do subleito e na execução de aterros com solos argilosos úmidos. O tratamento do substrato argiloso favorece, também, a compactação dos estratos superiores, uma vez que, uma boa

compactação não pode ser alcançada sobre um material mole. Milhares de quilômetros de estradas em todo o mundo, bem como aeroportos, têm sido construídos sobre solos estabilizados com cal e/ou cimento.

2.4.1 A cal

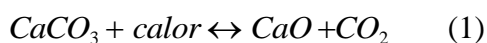
A cal pode ser considerada um dos produtos manufaturados mais antigos da humanidade. Segundo a Associação Brasileira dos Produtores de Cal ABPC (2008), pode-se constatar a existência de testemunhos relacionados ao uso dos calcários e dos seus produtos derivados em obras grandiosas da antiguidade e empregos no uso doméstico.

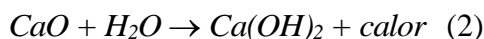
Devido à sua diversidade de aplicação, a cal tornou-se um dos materiais de maior importância para a sociedade atual. Embora fosse conhecida pelas civilizações egípcias, gregas e romanas, sua produção e seu uso foram abandonados por alguns séculos, sendo redescobertos no fim da Idade Média (GUIMARÃES, 2002).

De acordo com Guimarães (2002), no Brasil, a indústria da cal iniciou suas atividades na época colonial, quando da instalação das primeiras “caieiras” para a fabricação de cal virgem a partir de conchas marinhas para ser utilizada nas argamassas de revestimento e pintura do casario da cidade de Salvador na Bahia. A colonização portuguesa levou para o interior do território brasileiro, a arte de fabricar a cal, principalmente, para proteger as paredes de barro armado ou socado de suas moradias e as fortificações das abundantes e freqüentes chuvas tropicais.

Guimarães (2002) define a cal utilizada na estabilização ou melhoria dos solos como os produtos resultantes da calcinação, em temperaturas próximas de 1.000°C, das rochas carbonatadas cálcicas e magnesianas existentes na superfície terrestre. Estes produtos são conhecidos como cal virgem cálcica, cal hidratada cálcica, cal virgem dolomítica, cal dolomítica hidratada normal tipo N, cal dolomítica hidratada tipo especial S, os tipos intermediários das cales cálcicas e dolomíticas (magnesianas) e a cal hidráulica. O autor ainda comenta que, a cal, na forma hidratada, deve obedecer, no mínimo, às determinações da ABNT (2003).

As reações de formação da cal virgem e da cal hidratada, respectivamente, são representadas pelas Equações 1 e 2 (GUIMARÃES, 2002):





Na Equação 1, tem-se a obtenção da cal cálcica a partir da calcinação do carbonato de cálcio, sendo que, em processo similar se obtém a cal dolomítica, mistura de óxido de cálcio e de óxido de magnésio ($\text{CaO} + \text{MgO}$), a partir da calcinação do calcário dolomítico. Na Equação 2, tem-se a formação da cal cálcica hidratada, formada pela combinação química do óxido da cal virgem com a água. Assim, podem-se ter os seguintes tipos de cales:

- $\text{CaO} \rightarrow$ cal cálcica virgem;
- $\text{CaO} + \text{MgO} \rightarrow$ cal dolomítica virgem;
- $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow$ cal cálcica hidratada;
- $\text{Ca(OH)}_2 + \text{MgO} \rightarrow$ cal dolomítica mono-hidratada;
- $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2 \rightarrow$ cal dolomítica bi-hidratada

Na Tabela 1 a seguir são apresentadas propriedades com valores médios das cales comercializadas no mercado brasileiro, segundo Guimarães (2002).

Tabela 1. Composição média das cales brasileiras.

Tipo de Cal	CaO (%)	MgO (%)	Insolúvel no HCl (%)	Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ (%)	Perda ao Fogo (%)	CO ₂ (%)	SO ₃ (%)	CaO + MgO base de não-volátil (%)	MgO não hidratado (%)
Cal Virgem Cálcica	90-98	0,1-0,8	0,5-3,5	0,2-1,0	0,5-5,0	0,2-3,8	0,1-0,6	96-98,5	-
Cal Hidratada Cálcica	70-74	0,1-1,4	0,5-2,5	0,2-0,8	23-27	1,5-3,5	0,1-0,0	96-98,5	0,5-1,8
Cal Hidratada Dolomítica ou Magnésiana	39-61	15-30	0,5-18,2	0,2-1,5	19-27	3,0-6,0	0,02-0,2	76-99	5-25
Cal Virgem Dolomítica ou Magnésiana	51-61	30-37	0,5-4,5	0,2-1,0	0,5-4,8	0,5-4,5	0,05-0,1	76-99	-

Fonte: Guimarães (2002).

No mercado global da cal, a cal virgem cálcica ou calcítica predomina, particularmente, pela sua aplicação nas áreas das indústrias siderúrgicas, de açúcar e de celulose. Outro tipo de cal muito utilizado no mercado é a cal hidratada cálcica que é um pó de cor branca resultante da combinação química dos óxidos anidros da cal virgem com a água.

A cal hidratada é o tipo de cal mais usada na construção civil, em especial na estabilização de solos para fins rodoviários.

Segundo a ABNT (2003), a cal hidratada pode ser classificada nos tipos CH I, CH II e CH III, quanto à concentração de óxidos de cálcio e de magnésio. Para fins de classificação das cales, todos os tipos devem ser submetidos aos mesmos ensaios, porém há exigência de limite menor de óxidos de cálcio e magnésio não hidratados para a cal CH I.

Quanto à concentração de óxidos de cálcio, as cales podem ser classificadas em: (i) cal virgem cálcica, com teores de óxido de cálcio entre 90 e 100% dos óxidos totais presentes; (ii) cal virgem magnésiana, com teores intermediários de óxido de cálcio entre 65 e 90% dos óxidos totais presentes; e (iii) cal virgem dolomítica, com teores de óxido de cálcio entre 58 e 65% dos óxidos totais presentes.

A cal utilizada nesta pesquisa trata-se de uma cal hidratada do tipo CH III. Para a utilização da cal na forma hidratada para estabilização ou melhoria dos solos no Brasil, deve-se obedecer, no mínimo, às exigências da ABNT (2003). A Tabela 2 apresenta algumas das exigências contidas nessa norma.

Tabela 2. Exigências químicas e físicas para comercialização das cales hidratadas.

Exigências químicas				
Compostos		Limites (%)		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO ₂)	Na fábrica	≤ 5	≤ 5	≤ 13
	No depósito	≤ 7	≤ 7	≤ 15
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO + MgO)		≤ 10	≤ 15	≤ 15
Óxidos totais na base não-voláteis (CaO _t + MgO _t)		≥ 88	≥ 88	≥ 88
Exigências físicas				
Compostos		Limites (%)		
		CH-I	CH-II	CH-III
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600mm	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
	Peneira 0,075mm	≤ 10	≤ 15	≤ 15
Retenção de água		≤ 75	≤ 75	≤ 70
Incorporação de areia		≥ 3,0	≥ 2,5	≥ 2,2
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110

Fonte: ABNT (2003).

2.4.2 Reações solo-cal

Para Cristelo (2001), as principais reações químicas que ocorrem durante o processo de estabilização de solos com a cal são as trocas catiônicas com consequente floculação, as reações pozolânicas ou de cimentação e a carbonatação, como segue:

- trocas catiônicas e floculação: a adição de cal a um solo com fração argila leva ao desenvolvimento de reações de trocas catiônicas que ocorrem em curto prazo e produzem alteração da densidade de cargas elétricas presentes nas partículas de argila, com subsequente redução da espessura da dupla camada difusa e do potencial eletrocinético, observando-se uma tendência à floculação;
- reações pozolânicas: são reações de médio a longo prazo que dão origem à formação do silicato hidratado de cálcio e/ou do aluminato de cálcio hidratado, através das reações entre a cal, a sílica e a alumina livre nas partículas de argila. A interação entre os íons cálcio e a argila provoca a dissolução da sílica e da alumina das partículas do solo em um ambiente de pH elevado. Os íons dissolvidos combinam-se com os íons de cálcio e formam-se agentes cimentantes que se interligam nas partículas argilosas, sendo responsáveis por aumentos significativos de resistência mecânica; e
- carbonatação: consiste na reação entre a cal e o dióxido de carbono presente na atmosfera, formando materiais cimentícios relativamente fracos, tais como o carbonato de cálcio ou de magnésio.

Segundo Cristelo (2001), a estabilização com cal é feita com óxido de cálcio (cal viva) ou hidróxido de cálcio (cal hidratada). A cal agrícola é usualmente carbonato de cálcio, portanto, é ineficaz para o melhoramento e estabilização dos solos e, além disso, não segue as especificações da ABNT (2003). O autor comenta ainda que a estabilização depende das reações que ocorrem entre a cal e os minerais de argila, e que os principais resultados destas reações são: (i) o aumento da resistência mecânica e da capacidade de carga do solo; (ii) a redução da susceptibilidade à dilatação e à retração; e (iii) a redução da umidade e a melhora da trabalhabilidade e das características de compactação.

2.4.2.1 Trocas catiônicas e floculação

Os efeitos das reações de trocas catiônicas, de atuação imediata, são correlacionados com alterações em propriedades físicas dos solos finos, especialmente, nos limites de Atterberg e na granulometria (LIMA et al., 2003). Na interação da cal com um solo fino ocorrem reações de troca catiônica, que produzem compressão da dupla camada difusa de sua fração argila, com a ocorrência de consequente floculação-aglomeração das partículas.

Na literatura (LIMA, 1981; TRB, 1987; CRISTELO, 2001), geralmente, considera-se que a adição de cal a um solo fino pode produzir as seguintes alterações: (i) granulometria: a floculação das partículas se traduz pelo deslocamento da curva granulométrica para o lado mais granular; (ii) limites de Atterberg: a alteração mais notável se relaciona ao limite de plasticidade, que normalmente aumenta de valor; (iii) compactação: para uma mesma energia de compactação, ocorre diminuição do valor da densidade aparente seca máxima e aumento do valor da umidade ótima; e (iv) variação volumétrica: há menor variação volumétrica.

De acordo com Nóbrega (1985), em presença de água, a cal adicionada provoca a saturação dos minerais argilosos do solo pelos cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} . Isto modifica, instantaneamente, todas as propriedades dependentes da carga e do estado da superfície das partículas (limites de consistência). Os cátions trocáveis do complexo de troca determinam de certa forma, as ligações entre as partículas de argila e o seu modo de associação, mudando o seu comportamento hidro-mecânico.

Conforme Little (1995), com a troca catiônica, as partículas de argila aproximam-se mais umas das outras nas misturas solo-cal, devido à redução da dupla camada difusa e consequentemente do potencial eletroquímico ou potencial de Stern, e ocorre o fenômeno da floculação, com partículas ligando-se no formato bordo-face. Tal fenômeno é causado pelo aumento da concentração eletrolítica da água intersticial, pelo alto pH produzido e pela redução na espessura da camada de água adsorvida, através de trocas catiônicas.

Diamond e Kinter (1965) relatam que apenas o efeito da troca de cátions e a floculação não podem ser considerados como responsáveis pela ação estabilizante da cal, haja vista que muitos solos em seu estado natural já estão saturados de cálcio ou floculados e, mesmo assim, necessitam ser tratados para servirem como materiais de construção civil. Esses autores ressaltam que as melhorias nas propriedades plásticas de um solo fino devem-se às reações químicas imediatas que ocorrem nos pontos de contato bordo-face das suas partículas de argila, dentro dos flocos. Existe, nesta fase inicial, a formação de pequenas quantidades de

aluminato hidratado tetracálcico em nível suficiente para estabilizar os flocos e entrelaçar as partículas, com conseqüente redução do índice de plasticidade, da contração e da expansibilidade do solo.

2.4.2.2 Reações pozolânicas

As reações pozolânicas são responsáveis por ganhos de resistência mecânica nos solos a médio e longo prazos, devido às reações que se desenvolvem entre a cal, a água, a sílica e a alumina do solo, com a formação de silicatos e aluminatos hidratados de cálcio. Essas reações são de natureza complexa e influenciadas pela mineralogia da fração argila, podendo-se agrupar os solos em reativos e não reativos à ação da cal. Nos primeiros, há aumento significativo de resistência mecânica, devido ao desenvolvimento de reações pozolânicas que produzem uma matriz de cimentação ao redor de suas partículas, enquanto que nos segundos, devido à indisponibilidade de sílica e alumina solubilizadas para reagirem com os íons cálcio, não ocorre ganho significativo de resistência mecânica (LIMA, 1981; TRB, 1987).

Segundo o TRB (1987), o mecanismo de reações pozolânicas envolve a liberação de íons hidroxila da cal, que elevam o pH da mistura a um valor suficientemente elevado, de modo que a sílica e a alumina da fração argila sejam dissolvidas, favorecendo a introdução de cargas negativas no sistema. Essas reações formam géis de silicatos e/ou aluminatos hidratados de cálcio, sendo que as reações não cessam enquanto houver disponibilidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sílica e alumina no solo. Ingles e Metcalf (1972) destacam que os géis de aluminossilicatos resultantes da reação, imediatamente cobrem e ligam as partículas de argila, bloqueando os vazios. Conforme esses autores, os géis são cristalizados lentamente e transformados em silicatos hidratados de cálcio e alumínio bem definidos, sendo que essas reações ocorrem em presença de água, que tem a função de carregar os íons de cálcio e hidroxila para a superfície da argila.

Harty e Thompson (1973) relatam que os fatores considerados importantes no desenvolvimento de reações pozolânicas são o teor de cal, as condições de cura e as propriedades naturais do solo, tais como: teor de matéria orgânica, características do complexo de troca catiônica, carbonatos livres, sulfatos livres, enriquecimento por sódio, quantidade de sílica, alumina e óxidos de ferro (total ou extraível), teor e plasticidade da fração argila, mineralogia da fração argila e pedologia.

Para Guimarães (2002), apesar de não se constituírem em pozolanas propriamente ditas, os solos podem apresentar uma fração argila com caráter pozolânico mais ou menos acentuado, dependendo de sua natureza mineralógica e textural. No que tange às reações pozolânicas, o referido autor realça que, ao se adicionar cal ao solo, o seu pH, em geral 4,5 à 6,5, eleva-se para 11-12, criando-se condições alcalinas nas quais os minerais da fração argila, e até o próprio quartzo, podem reagir com a cal. Assim, são formados silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, em números bastante significativos, todos com influência no processo de estabilização do solo, pelas suas características cimentantes.

2.4.2.3 Carbonatação

Outra reação que pode ocorrer durante a estabilização do solo com a adição da cal é a carbonatação. De acordo com Guimarães (2002), esta reação apresenta origem diferente das anteriores. Contudo, também tem características de ação imediata e é de alta importância para a ocorrência ou não das finalidades do processo de estabilização. Segundo o autor, a carbonatação é a combinação do óxido ou hidróxido de cálcio ou magnésio com o anidrido carbônico presente nas minúsculas bolhas de ar, absorvidas ou retiradas no momento da mistura ou pela penetração do ar nos poros após a execução. Tal reação tende a refazer o carbonato de cálcio, na forma de um novo corpo sólido que se entrelaça com os demais constituintes do solo, ou seja, tende a refazer o carbonato original, visto que a decomposição pelo calor é uma reação reversível.

Cristelo (2001) relata que o carbonato formado é um composto de cimentação fraco e deletério para o resultado final em termos de resistência. Além disso, o carbonato de cálcio é uma substância com elevada plasticidade, o que, conseqüentemente, aumenta a plasticidade do solo e floclula as partículas de cal, dificultando assim a sua reação com as partículas coloidais argilosas. Devido a esses aspectos, Lima (1981) destaca que a ocorrência dessa reação é indesejável e deve ser minimizada nas aplicações rodoviárias, sendo que Santos (2004) refere que a mesma pode ser impedida à medida que alguns cuidados são tomados, como a impermeabilização da superfície de contato da mistura com o ar.

2.5 Resistência mecânica dos solos estabilizados com cal

A resistência das misturas solo-cal normalmente é avaliada através da resistência à compressão não confinada e depende de diversas variáveis, como: tipos de solo e cal, teor de cal, tempo e temperatura de cura (TRB, 1987).

Santos (2004) afirma que, de maneira geral, a resistência mecânica do solo tratado com cal aumenta à medida que se adiciona uma porcentagem maior deste estabilizante, sendo este ganho intimamente ligado ao período e a temperatura de cura a que a mistura foi submetida. A autora comenta que, dos materiais envolvidos na mistura solo-cal, a natureza do solo é a que mais interessa, uma vez que a cal é facilmente selecionada e controlada.

Com relação à natureza do solo, estudos mostram que as argilas expansivas apresentam uma resposta mais rápida à adição de cal. Bell (1996) relata a ocorrência de um rápido aumento inicial na resistência à compressão não confinada de um solo contendo montmorilonita, com pequenos teores de cal (2 a 3%). Além disso, para este solo, 4% de cal foram suficientes para atingir a resistência máxima, enquanto que, para um solo rico em caulinita, a resistência máxima foi atingida com teores entre 4 e 6%. Entretanto, o nível de resistência alcançado pela mistura solo caulinítico e cal foi sensivelmente superior ao da outra.

O efeito mais importante proporcionado por um período de cura relativamente longo das misturas solo-cal ditas reativas é o desenvolvimento de produtos pozolânicos (LIMA, 1981; TRB, 1987). O aumento da quantidade destes produtos resulta em mais ligações de cimentação para manter as partículas de solo em contato e em uma mudança mineralógica favorável ao aumento da resistência mecânica.

Ingles e Metcalf (1972) apresentam um estudo sobre a influência do tempo de cura em diferentes tipos de solos tratados com 5% de cal hidratada, observando taxas de ganhos de resistência maiores em pedregulhos arenosos, conforme se apresenta na Figura 2.

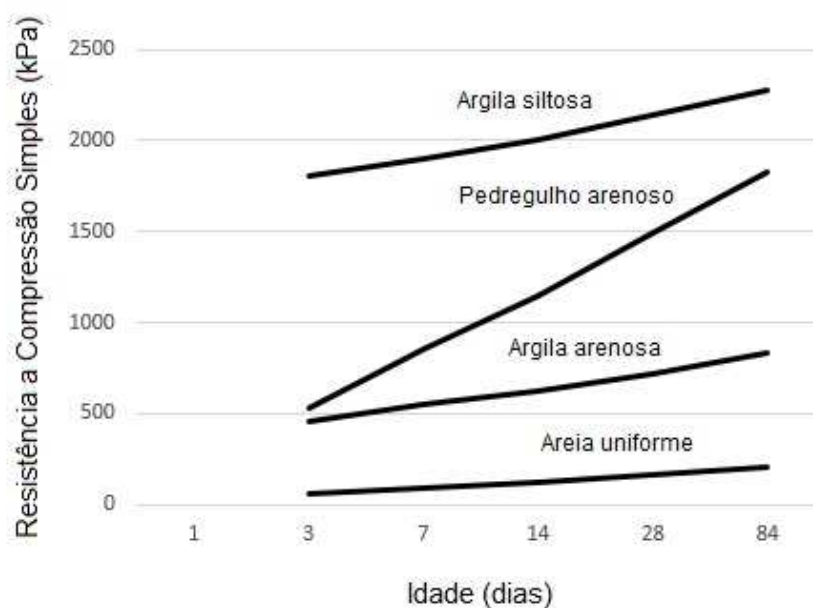


Figura 2. Efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal, adaptada de INGLES; METCALF (1972).

Lopes Júnior (2007) comenta que misturas do solo residual de arenito Botucatu-SP com 25% de rocha basáltica pulverizada de resíduo de britagem (SRAB-25% RBR- CAL), tratadas com 3, 5, 7, 9 e 11% de cal, curadas com 90 dias, apresentaram, em média, resistências 50% superiores em relação às amostras com 28 dias de cura. Esse autor utilizou, também, teores de umidade de moldagem de 10, 12, 14 e 16%, sendo que os resultados obtidos indicaram que a variação de umidade de moldagem não afetou a resistência à compressão não confinada para os tempos de cura (28 dias e 90 dias), assim como se verificou não existir relação entre a resistência à compressão não confinada e a relação água/cal.

Destaca-se que, na estabilização solo-cal, Ingles e Metcalf (1972) consideram que a água somente é necessária para transportar os íons de cálcio e hidroxila para a superfície da argila para que ocorram as reações químicas e que o teor ótimo de água obtido pelo ensaio de compactação é suficiente para efetivar este processo.

Little (1995) enfatiza a importância da escolha apropriada da mistura, bem como do teor em cal, de modo a maximizar as características de resistência mecânica em longo prazo. Este autor relata vários resultados de ensaios de compressão não confinada, efetuados sobre corpos de prova com longos períodos de cura, nos quais foi evidente o aumento da resistência mecânica, mesmo nos solos que não evidenciaram inicialmente uma elevada reatividade com a cal. Em ensaios efetuados sobre solos da Califórnia e apresentados pelo mesmo autor,

verificaram-se aumentos consideráveis da resistência mecânica, embora os solos apresentassem valores de plasticidade reduzidos. Isto indica que mesmo pequenas quantidades de argila reativa à cal podem ser suficientes para originar aumentos significativos de resistência mecânica.

Posteriormente, Lopes Júnior (2011) se propôs a avaliar separadamente a relação das grandezas volume de vazios (V_v) e o inverso do volume de cal ($1/V_{ca}$) com a resistência à compressão não confinada (q_u). O autor explica que a taxa de variação da resistência em relação a cada uma dessas grandezas foi substancialmente diferente. Buscando compatibilizar as taxas de variação das grandezas citadas, ele aplicou uma potência sobre uma delas. Após diversas tentativas, constatou-se que, ao se aplicar uma potência de 0,12 sobre o parâmetro C_{av} , que se refere ao teor volumétrico de cal e é expresso em porcentagem do volume total, houve uma melhor compatibilização entre as taxas de variação, resultando em um melhor ajuste para a relação vazios/cal. Este fator está associado ao tipo de agente cimentante, à matriz do solo e ao mecanismo de cimentação.

A Figura 3 apresenta as curvas de variação da resistência à compressão não confinada em função da relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/C_{av}) ajustado pela potência 0,12 para corpos de prova de 28, 90 e 360 dias de cura. O teor de umidade dos corpos de prova é de 14%, porém as quantidades de cal e porosidades são variadas.

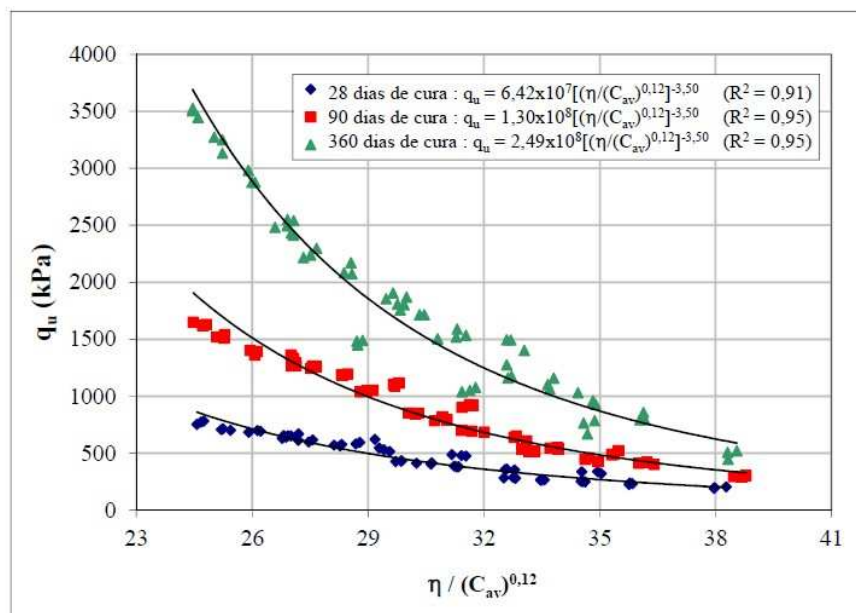


Figura 3. Resistência à compressão não confinada (q_u) versus relação vazios/cal (η/C_{av}) do SRAB-25% RBR-CAL (LOPES JUNIOR, 2011).

Na Figura 3, pode-se observar uma boa correlação entre o volume de vazios/volume de cal ajustados à resistência à compressão não confinada do solo-cal compactado estudado pelo autor.

Na literatura relata-se que os ganhos na resistência mecânica das misturas solo-cal são bastante influenciados pelo período de cura e temperatura de cura (HERRIN; MITCHELL, 1967; THOMPSON, 1970; DRAKE et al., 1972; TRB, 1987). Os solos estabilizados com cal exibem geralmente um rápido aumento da resistência no início do período de cura, diminuindo então essa taxa de crescimento com o tempo de cura. Biswas (1972) relata que a velocidade de aumento da resistência relaciona-se diretamente com a temperatura de cura.

Pinto (1965) afirma que a cura em temperaturas elevadas provoca um ganho de resistência muito rápido, conforme se ilustra na Figura 4. O autor comenta ainda que, em solos brasileiros, foram registradas resistências à compressão não confinada de corpos de prova curados por 7 dias, à temperatura de 60°C, de 8,3 a 23,0 kgf/cm², conforme o solo e o teor de cal empregado, valores estes intermediários àqueles obtidos com cura de 100 a 200 dias, à temperatura de 25°C.

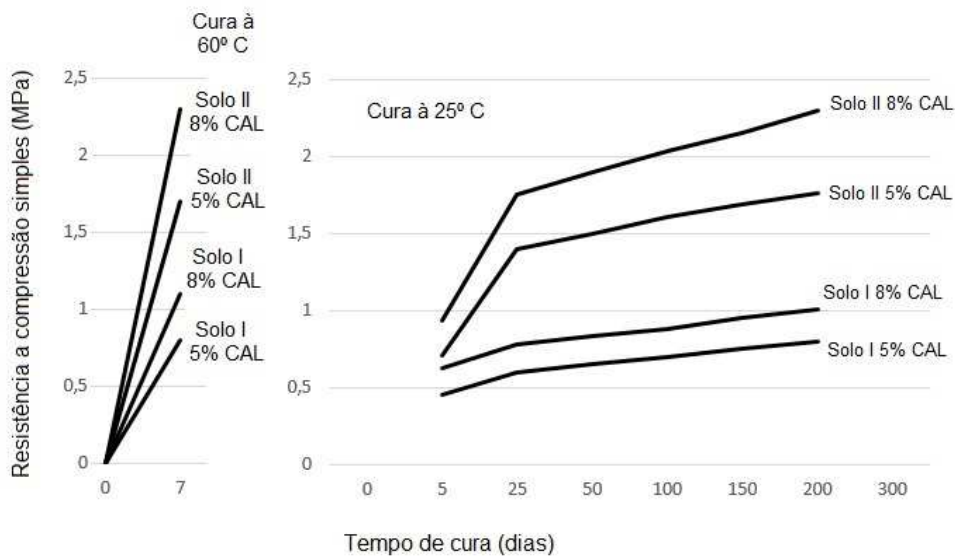


Figura 4. Influência da temperatura e do tempo de cura na resistência à compressão não confinada das misturas solo-cal, adaptada de PINTO(1965).

Os trabalhos de Lu et al. (1961) podem ser citados, a nível internacional, com relação à influência do tipo de cal na resistência mecânica de misturas solo-cal. Os autores realizaram um estudo de laboratório, para verificar os efeitos de várias cales sobre a resistência mecânica de diversos solos, concluindo a respeito do desempenho superior das cales dolomíticas sobre

as cálcicas, em especial para teores de cal superiores a 4%. Vale destacar que Mendonça (1998), também, obteve melhor desempenho de uma cal dolomítica comercial em relação a uma cálcica comercial, analisando o parâmetro resistência à compressão não confinada de misturas solo-cal produzidas com um solo residual maduro e com um solo residual jovem da Zona da Mata de Minas Gerais.

Mendonça et al. (1996), através da estabilização de dois solos da região de Viçosa-MG utilizando a cal como estabilizador e a temperatura como agente de cura acelerada, concluem que o desenvolvimento das reações pozolânicas entre a cal e o solo está diretamente relacionado à temperatura de cura. Quando curada à baixa temperatura, o aumento na resistência mecânica das misturas é pequeno, ao passo que, para temperaturas mais elevadas, essas resistências evoluem com extrema rapidez.

Silvani (2013) destaca a influência da temperatura de cura no comportamento mecânico de misturas areia-cinza-volante-cal, no qual, para todas as temperaturas estudadas, as resistências à tração na compressão diametral e à compressão não confinada aumentaram linearmente com o aumento do teor de cal. A elevação da temperatura provocou ganhos na resistência à tração na compressão diametral quando a temperatura aumentou de 20°C para 27°C e de 27°C para 35°C, porém não variou significativamente quando a temperatura de cura mudou de 35°C para 50°C, provavelmente, devido à extinção das reações pozolânicas. Porém, na resistência à compressão não confinada os aumentos pararam de ser significativos a partir da temperatura de 27°C.

Vale ainda ressaltar que a temperatura de cura tem maior influência no ganho de resistência em tempos de cura menores, logo, pode-se alterar esta variável quando se deseja um ganho de resistência mais rápido (SILVANI, 2013, 2017).

2.6 Permeabilidade e compressibilidade dos solos estabilizados com cal

Segundo Cristelo (2001), a permeabilidade de um solo pode ser alterada significativamente devido à dissolução dos minerais presentes no mesmo e às reações de troca catiônica. A adição de cal ao solo produz ambos os efeitos conforme explicitado anteriormente. O resultado destes efeitos, quando o íon é o Ca^{2+} , consiste no aumento da permeabilidade, pelo menos inicialmente.

A densidade na qual a mistura é compactada é de importância similar à da quantidade de cal. Com o aumento da densidade, a resistência aumenta, a permeabilidade diminui até um valor mínimo, próximo da umidade ótima, depois começa a aumentar novamente (INGLES; METCALF, 1972).

Benetti (2015), ao estudar o comportamento hidráulico e mecânico de um solo residual arenito de Botucatu de resíduo de britagem tratado com cal (SRAB-25% RBR-CAL) comenta que de maneira contrária à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre a permeabilidade do compósito em estudo. Quanto mais denso, menos poroso e com menor índice de vazios for o corpo de prova, menor é a sua permeabilidade. Segundo esse autor, independentemente da quantidade de cal utilizada, a redução da porosidade do material promove uma diminuição considerável na permeabilidade, de pelo menos uma ordem de grandeza, dentro da faixa de valores avaliada. Os materiais de cimentação formados devido à adição de cal tendem a diminuir a porosidade do solo tratado e, portanto, o seu coeficiente de permeabilidade.

Little (1995) destaca aumentos significativos da permeabilidade devido ao tratamento com cal, tendo relacionado estes aumentos com o aumento da porosidade motivado pela floculação. Deste trabalho, conclui-se que, inicialmente, as misturas solo-cal registram um aumento da permeabilidade seguido de uma diminuição. Tal fato se deve à acumulação, nos interstícios da mistura, dos produtos pozolânicos desenvolvidos.

Ainda segundo Little (1995), a permeabilidade de muitos destes solos estabilizados com cal permanece, contudo, consideravelmente mais elevada do que a dos solos originais, embora se verifique, em alguns casos, uma redução da permeabilidade para valores muito próximos dos originais. Avaliando-se a permeabilidade de três solos expansivos do Norte do Texas, esse autor verifica que os solos estabilizados com a cal apresentam aumento de permeabilidade de 7 a 300 vezes maior do que o solo não tratado.

Contudo, com o aumento do tempo de cura, em solos coesivos ou granulares, a permeabilidade da mistura solo-cal tende a diminuir. Segundo Cristelo (2001), este fenômeno explica-se fundamentalmente pela ação de cimentação desenvolvida ao longo do tempo de cura, no qual o esqueleto sólido é parcialmente envolto em uma massa gelatinosa, enquanto se desenvolvem nos vazios os produtos de cimentação responsáveis pelo aumento da rigidez da mistura. Verifica-se, assim, alteração da estrutura do solo, com a diminuição do volume de ar nele contido. Adicionalmente, as partículas do solo estabilizado são envolvidas em uma fina

película de água, de tal forma que o volume de vazios resultante começa a diminuir, o que também provoca uma progressiva redução da permeabilidade.

Esse autor destaca que, em solos argilosos cujo teor de umidade é inferior ao teor ótimo, a permeabilidade é menos afetada pela adição de cal, o que se deve ao fato, do solo, nesta circunstância já possuir estrutura com tendência à floculação. Quando o teor de umidade é igual ou superior ao teor ótimo, a quantidade de cal adicionada tem real influência no coeficiente de permeabilidade da mistura.

No que se refere à compressibilidade, há poucos estudos dirigidos às misturas solo-cal, principalmente em pesquisas nacionais com solos brasileiros.

Rajasekaran e Rao (2002), ao estudarem a compressibilidade de uma argila marinha estabilizada com cal, relatam uma redução de 1/2 para 1/3 na compressibilidade do sistema solo-cal dentro de 30 a 45 dias de tratamento, assim como destacam a formação de vários compostos de cimentação devido a reações solo-cal, com melhoria das características mecânicas do solo com o tempo. Os resultados encorajam a aplicação de técnicas de injeção de cal para melhorar o comportamento de engenharia de depósitos argilosos marinhos moles. No entanto, os autores alertam que é preciso ser cauteloso na aplicação da técnica solo-cal para argilas marinhas que contêm sulfato de sódio.

De Brito Galvão et al. (2004) destacam os parâmetros de compactação de solos estabilizados com cal, ao investigarem o efeito da cal hidratada sobre a permeabilidade e compressibilidade de dois solos brasileiros: um solo saprolítico e um laterítico. Os resultados obtidos por esses autores mostram que o coeficiente de permeabilidade do solo saprolítico teve aumento de cinco vezes com a adição de 2% de cal e, em seguida, diminuiu com mais uma adição de cal. Isto foi atribuído ao surgimento de ligações químicas e ao fenômeno de agregação–floculação das partículas.

Ainda segundo esses autores, quanto ao solo laterítico, o coeficiente de permeabilidade diminuiu com a adição de cal. Isto foi também atribuído ao mesmo mecanismo, exceto que as ligações são mais fracas do que aquelas desenvolvidas no solo saprolítico. Uma melhoria substancial ocorreu na compressibilidade dos solos com a adição de 4% de cal. Além disso, verificou-se que o tratamento com a cal foi eficaz em diminuir o potencial de colapso dos dois solos quando compactados em densidades mais baixas do que a densidade seca máxima.

Rao e Shivananda (2005), a respeito da compressibilidade da mistura argila-cal, concluem que a estabilização com a cal provoca a formação de ligações de cimentação entre os colóides da argila, o que aumenta a sua resistência mecânica e reduz a sua compressibilidade.

2.7 Ensaio de adensamento com velocidade constante de deformação

O ensaio de adensamento com velocidade constante de deformação, CRD, tem recebido destaque de pesquisadores (CARVALHO et al., 1993; LIMA, 1996; KASSIN; CLARKE, 1999; SPANNENBERG, 2003; MOURA, 2004; ANDRADE, 2009; VITOR, 2012), dentre as diferentes modalidades de realização de ensaios de adensamento. Tal aspecto se explica pela relativa simplicidade do mecanismo de transmissão de força ao corpo de prova.

A principal vantagem do ensaio sobre o dito tradicional é a diminuição do tempo necessário para a sua realização. Enquanto um ensaio tradicional tem duração de 10 a 15 dias, o ensaio CRD pode requerer cerca de um dia para ser executado. Outra vantagem importante dos ensaios CRD é que com a aquisição contínua dos dados, a curva índice de vazios em função da tensão vertical efetiva, em escala logarítmica (e *versus* $\log \sigma'_v$), é definida com maior número de pontos, que melhora a precisão na estimativa dos parâmetros de compressibilidade (SPANNENBERG, 2003).

Este ensaio consiste em aplicar ao corpo de prova um carregamento vertical com velocidade constante de deformação. A drenagem é permitida em apenas uma das faces do corpo de prova, em geral o topo, sendo que, a outra face deve ser mantida sob condições não drenadas. No ensaio, a aplicação do carregamento é feita por uma prensa similar à utilizada em ensaios triaxiais com deformação controlada, conforme mostra o esquema da Figura 5. Mantém-se, assim, o conceito do ensaio, que é o de impor ao corpo de prova uma taxa de deformação constante ao longo do tempo. Durante o ensaio são medidos os valores da tensão vertical total aplicada no topo (σ_v), da poropressão na base (u_b) e da variação da altura (Δh) do corpo de prova.

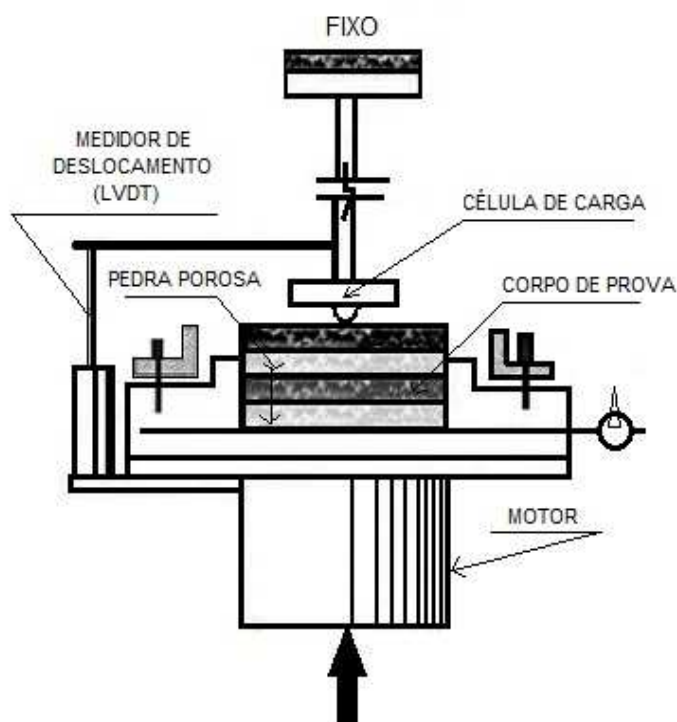


Figura 5. Equipamento do ensaio de adensamento CRD, adaptada de RIBEIRO (1992).

Um dos objetivos deste ensaio é determinar o valor da tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) com mais rapidez e precisão. Do ensaio CRD são obtidas as curvas e *versus* $\log \sigma'_v$ e os parâmetros C_c e C_r , respectivamente, índices de compressão e recompressão referentes ao trecho de compressão virgem e ao trecho de recompressão.

Os índices C_c e C_r são as declividades da curva índice de vazios em função da tensão vertical efetiva, em escala logarítmica, cada qual em um local específico da curva. Estes índices estão associados diretamente à magnitude dos recalques e podem ser calculados, através das formulações como segue:

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v}, \text{ para o trecho de compressão virgem e } C_r \text{ para o trecho de recompressão.}$$

em que: Δe é a variação do índice de vazios e $\Delta \log \sigma'_v$ é a variação da tensão vertical efetiva em escala logarítmica.

Há diversidade de critérios para a seleção da velocidade no ensaio CRD encontrados na literatura, como os propostos por Smith e Wahls (1969), Wissa et al. (1971), Gorman et al. (1978), Armour e Drnevich (1986), além do critério da ASTM (2012). Verifica-se que a

maioria deles prescreve diretamente a velocidade com base na razão entre a poropressão e a tensão vertical total (u_b/σ_v) ou então associa essas duas condições. Para a determinação da velocidade adequada a ser utilizada no ensaio, devem-se considerar o objetivo do estudo e as limitações teóricas para a análise dos resultados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Nesta pesquisa utilizou-se um solo residual maduro de gnaiss, pedologicamente classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, que apresenta horizonte B latossólico de tonalidade avermelhada, aspecto poroso e granulometria argilo-areno-siltosa. Coletou-se a amostra de solo no horizonte B de um talude de corte localizado no Alto dos Barbados, Campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), no ponto de coordenadas geográficas de posição 20° 45' 11,1" de latitude Sul e 42° 51' 31,2" de longitude Oeste de Greenwich, como se ilustra na Figura 6.



Figura 6. Local de coleta do solo Latossolo Vermelho-Amarelo.

O estabilizante químico utilizado no presente estudo foi uma cal hidratada do tipo CH-III, fabricada pela Indústria de Calcinação S.A. (ICAL) sob a designação de Supercal e comercializada na cidade de Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

3.2 Métodos

3.2.1 Preparação das amostras de solo

O programa de ensaios de laboratório com o solo em análise foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da UFV.

A preparação das amostras de solo para os ensaios de caracterização e para a moldagem dos corpos de prova para os ensaios de resistência mecânica, permeabilidade e compressibilidade englobou os procedimentos de secagem ao ar, destorroamento, peneiramento e determinação da umidade higroscópica do solo, conforme os protocolos estabelecidos pela ABNT (2016a).

3.2.2 Preparação das misturas solo-cal

As misturas foram ensaiadas nos teores de cal na faixa de 1 a 6%, de modo a atender aos requisitos de solo melhorado com cal e de mistura solo-cal preconizados pelo DNIT (2006).

As quantidades de cal utilizadas nas misturas foram calculadas em relação à massa seca do solo e as quantidades de água em relação à soma das massas de solo seco e cal. Para o início dos ensaios de compactação e confecção dos corpos de prova, esperou-se o período de uma hora após a homogeneização da mistura solo-cal-água, a fim de promover a ocorrência das reações de troca catiônica entre o solo e a cal.

Em todos os ensaios, os corpos de prova compactados foram inseridos em sacos plásticos e selados, para cura posterior, como segue: (i) estudo da cura tradicional: períodos de cura de 3, 7, 28 e 90 dias, na temperatura de 22,8 °C; e (ii) estudo da cura acelerada: períodos de cura de 12, 24, 48 e 96 horas em estufa incubadora refrigerada do tipo B.O.D. (*Biochemical Oxygen Demand*) com microcontrole eletrônico de temperatura, nas temperaturas de cura de 10, 30, 40 e 50 °C.

A cal foi armazenada em tonel plástico adequadamente vedado, para minimizar a possibilidade de ocorrência de reações com o dióxido de carbono presente na atmosfera.

Como não há normatização para a compactação das misturas solo-cal ao nível federal no Brasil, optou-se por adotar a normatização do DNIT (2010) para a compactação de

misturas solo-cimento, com o emprego da energia do ensaio Proctor normal.

3.2.3 Caracterização geotécnica do solo e das misturas solo-cal

A Figura 7 apresenta o fluxograma do programa de ensaios mecânicos e hídricos realizados no solo natural e nas misturas solo-cal com cura tradicional e cura acelerada.

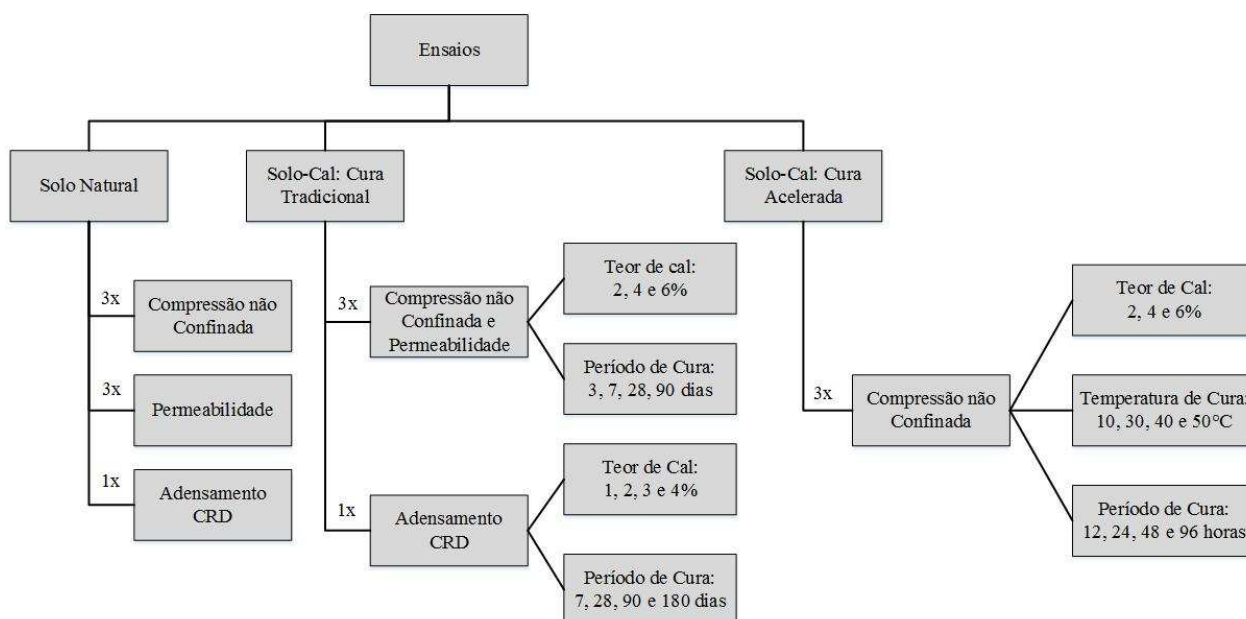


Figura 7. Fluxograma do programa de ensaios de laboratório realizados.

Os ensaios de caracterização geotécnica do solo e das misturas solo-cal foram realizados em obediência às seguintes normas: (i) caracterização geotécnica, com ensaios de granulometria (ABNT, 2016d), limite de liquidez (ABNT, 2016b), limite de plasticidade (ABNT, 2016c) e massa específica dos grãos (ABNT, 1984); (ii) ensaio de compactação (ABNT, 2016e), (iii) ensaio de compressão não confinada (ABNT, 1992); (iv) ensaio de permeabilidade (ABNT, 2000); e (v) ensaio de adensamento CRD (ASTM, 2012). Refere-se que os ensaios de compressão não confinada e de permeabilidade foram realizados com três repetições, enquanto que os outros ensaios foram realizados sem repetições.

Na Tabela 3, apresenta-se o quadro geral da quantidade de ensaios de compressão não confinada e adensamento CRD (ensaio mecânicos) e de permeabilidade (ensaio hidráulicos) realizados na pesquisa, totalizando um número de duzentos e trinta e nove ensaios.

Tabela 3. Ensaios mecânicos e hidráulicos realizados.

Ensaio	Solo Natural	Misturas solo-cal		Total de Ensaios
		Cura Tradicional	Cura Acelerada	
Compressão não confinada	3	36	144	183
Permeabilidade	3	36	-	39
Adensamento CRD	1	16	-	17

3.2.3.1 Ensaios de compactação das misturas solo-cal

Os ensaios de compactação foram realizados nas misturas solo-cal na modalidade dinâmica, de acordo com a metodologia recomendada pela ABNT (2016e), nos teores de cal de 1, 2, 3, 4 e 6 % em relação à massa de solo seca, empregando-se a energia de compactação Proctor normal.

3.2.3.2 Ensaios de compressão não confinada

Os corpos de prova para a realização dos ensaios de compressão não confinada (ABNT, 1992) foram moldados com relação altura/diâmetro de dois (2), na energia de compactação do ensaio Proctor normal, trabalhando-se com compactação dinâmica. Utilizou-se a velocidade de 1,0 mm/min nos ensaios com curas tradicional e acelerada, como também, nas amostras de solo ensaiadas sem tratamento, ou seja, em seu estado natural sem a adição do estabilizante químico.

Para os ensaios com cura tradicional, utilizaram-se os teores de cal de 2, 4 e 6% em relação à massa de solo seco, temperatura de cura de 22,8 °C e períodos de cura dos corpos de prova de 3, 7, 28 e 90 dias. Para os ensaios com cura acelerada, utilizaram-se os mesmos teores de cal, porém nas temperaturas de cura de 10, 30, 40 e 50 °C e períodos de cura de 12, 24, 48 e 96 horas.

No que tange às condições de moldagem dos corpos de prova e ao número de repetições de ensaio, os corpos de prova foram moldados na umidade ótima (w_{ot}) e massa específica aparente seca máxima (ρ_{dmax}) determinados nos respectivos ensaios de compactação, com três repetições. A Figura 8 mostra os corpos de prova recém-moldados, embalados e identificados para posterior cura em ambiente com controle de temperatura.



Figura 8. Corpos de prova dos ensaios de compressão não confinada.

A determinação da resistência à compressão não confinada foi realizada pela média das tensões máximas de ruptura dos três corpos de prova ensaiados, admitindo-se uma tolerância de $\pm 5\%$ em torno da média. Nos casos em que o desvio padrão superou o valor pré-estabelecido, procedeu-se à moldagem e execução do ensaio de outros três corpos de prova, aumentando-se, assim, o número de amostras e, conseqüentemente, a confiabilidade dos resultados. Além dos valores de tensão máxima de ruptura em função dos teores de cal, períodos e temperaturas de cura, através desses ensaios, determinaram-se, também, as relações tensão-deformação do solo e das misturas solo-cal ensaiadas.

3.2.3.3 Ensaios de permeabilidade

Os ensaios de permeabilidade com carga constante foram realizados no sistema de percolação em coluna implementado por Caneschi (2012).

Para a realização dos ensaios, em triplicata, corpos de prova cilíndricos do solo e das misturas solo-cal com 12 cm de altura e 10 cm de diâmetro foram compactados em moldes de PVC do equipamento de percolação em coluna apresentado na Figura 9, segundo o procedimento definido pela ABNT (2016e), nos parâmetros ótimos de compactação da energia do ensaio Proctor normal. Os corpos de prova das misturas solo-cal foram moldados nos teores de cal de 2, 4 e 6% em relação à massa de solo seco e posteriormente submetidos ao processo de cura durante 3, 7, 28 e 90 dias, à temperatura de 22,8 °C.

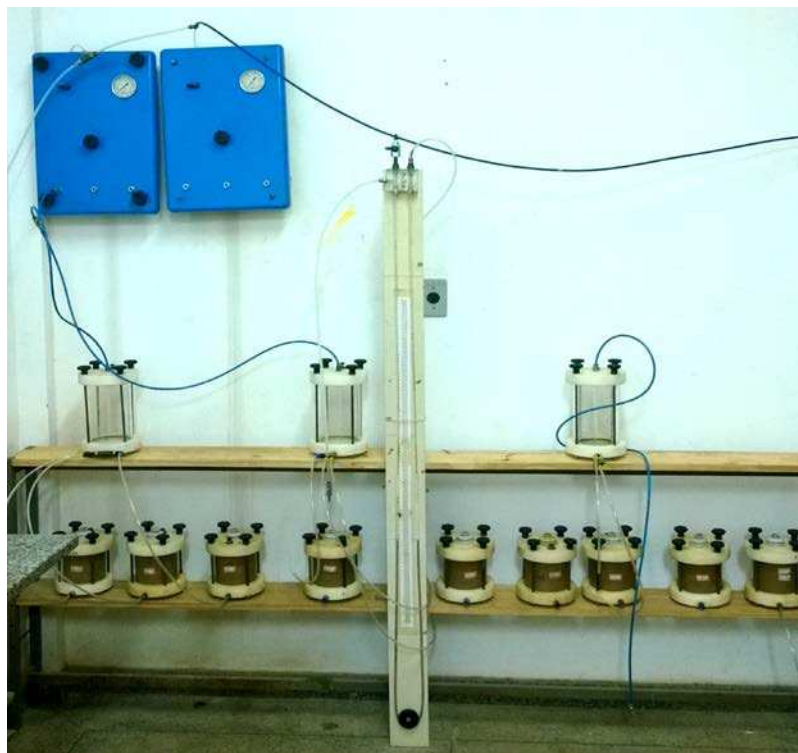


Figura 9. Visão geral do sistema de percolação em coluna implementado por Caneschi (2012) em uso, com a realização simultânea de nove ensaios de permeabilidade.

Empregou-se o gradiente 15 na realização dos ensaios de permeabilidade, vedando-se os cilindros com os corpos de prova do solo e das misturas solo-cal nas partes superior e inferior, de modo a permitir a ocorrência de fluxo de água no sentido ascendente dos corpos de prova. As leituras de volume e coleta do líquido percolado, com medição da temperatura, foram realizadas na parte superior dos cilindros.

Escolheu-se o gradiente 15 com base no estudo prévio de Costa (2016), que na aplicação dos gradientes de 15, 66, 85 e 140 nos ensaios de permeabilidade, com o mesmo permeâmetro utilizado nesta pesquisa, verificou aumento do coeficiente de permeabilidade com a elevação do gradiente hidráulico; porém, esse aumento, para fins práticos de engenharia, não representa uma variação significativa, já que os dados estão todos na mesma potência (10^{-8}). Na prática, essas variações no coeficiente de permeabilidade não representam variações significativas no volume percolado.

Para a percolação de água, empregaram-se interfaces de armazenamento conectadas aos corpos de prova na parte inferior, nas quais se aplicou a pressão de 1,8 mca (18kPa) no sistema de percolação com o auxílio de um tubo em U para se alcançar o gradiente hidráulico requerido. Para cada período de cura, foram ensaiados nove corpos de prova simultaneamente,

visto que cada interface estava conectada a três corpos de prova de mesmo teor de cal e mesmo período de cura, conforme se visualiza na Figura 9. Montados os corpos de prova e preenchidas as interfaces com água destilada, deu-se início ao fluxo, de modo a saturar os vazios e medir o coeficiente de permeabilidade dos corpos de prova. Para a determinação do coeficiente de permeabilidade, foi empregada a Lei de Darcy, com correção da viscosidade para as temperaturas de água medidas nos corpos de prova. O ensaio de permeabilidade foi executado em sala com temperatura mantida constante em $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Vale ressaltar que, segundo Caneschi (2012), o sistema de percolação em coluna teve seus fundamentos alicerçados nos sistemas convencionais de percolação empregados nos ensaios de laboratório para a determinação da condutividade hidráulica, ou seja, o sistema segue o que recomendam as normas NBR 14545 (ABNT, 2000) e NBR 13292 (ABNT, 1995b).

3.2.3.4 Ensaios de adensamento CRD

No presente estudo, utilizou-se o ensaio de adensamento CRD de acordo com os procedimentos da ASTM (2012) em detrimento do ensaio de adensamento tradicional por se tratar de uma técnica mais apurada e que possibilita a realização do ensaio em tempo menor, adequando-se satisfatoriamente à necessidade de se analisar a influência do período de cura na compressibilidade das misturas solo-cal.

Para a confecção dos corpos de prova das misturas solo-cal, utilizaram-se os teores de 1, 2, 3 e 4% de cal com relação à massa de solo seco, submetidos aos períodos de cura de 7, 28, 90 e 180 dias, sem repetição. Optou-se por não utilizar o teor de 6% de cal, como nos demais ensaios, devido a uma rigidez excessiva da mistura.

Os corpos de prova do solo e das misturas solo-cal, com diâmetro de 6,35 cm e área correspondente a $31,67\text{ cm}^2$, foram obtidos a partir de amostras compactadas na energia do ensaio Proctor normal e posteriormente moldados no anel de adensamento.

A preferência por este ensaio deveu-se, também, à relativa simplicidade do mecanismo de transmissão de força ao corpo-de-prova, representado pela prensa mecânica com controle de velocidade de carregamento que é também comumente empregada em ensaios triaxiais. A Figura 10 mostra a visão geral do equipamento utilizado no ensaio de adensamento CRD.



Figura 10. Visão geral do equipamento utilizado no ensaio de adensamento CRD.

A principal incerteza relativa ao ensaio consistiu na definição da velocidade a ser adotada, de particular influência nos resultados obtidos. Nesta pesquisa a velocidade adotada foi de 0,025 mm/min, de acordo com os critérios estabelecidos por Wissa et al. (1971). Estes autores sugerem que o valor da razão u_b/σ_v , sendo u_b a poropressão na base e σ_v a tensão total aplicada no topo, deve ser inferior a 30%, para garantir a uniformidade da tensão vertical efetiva ao longo do corpo de prova.

O ensaio iniciou-se após a saturação dos corpos de prova por 24 horas através do processo de aplicação de uma contrapressão de 100 kPa, já que, esta é muito importante para que se realize a completa saturação dos corpos de prova.

Vale ressaltar a rapidez do ensaio mesmo para uma velocidade relativamente baixa, como a utilizada de 0,025 mm/min. Após a saturação, a duração dos ensaios realizados no solo natural foi de 240 minutos e nas misturas solo-cal ensaiadas nos teores de 1, 2, 3 e 4% de cal, foi em média, respectivamente, de 210, 180, 165 e 150 minutos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização geotécnica do solo

A Figura 11 mostra a curva granulométrica do solo em estudo e a Tabela 4 traz os resultados da sua caracterização geotécnica.

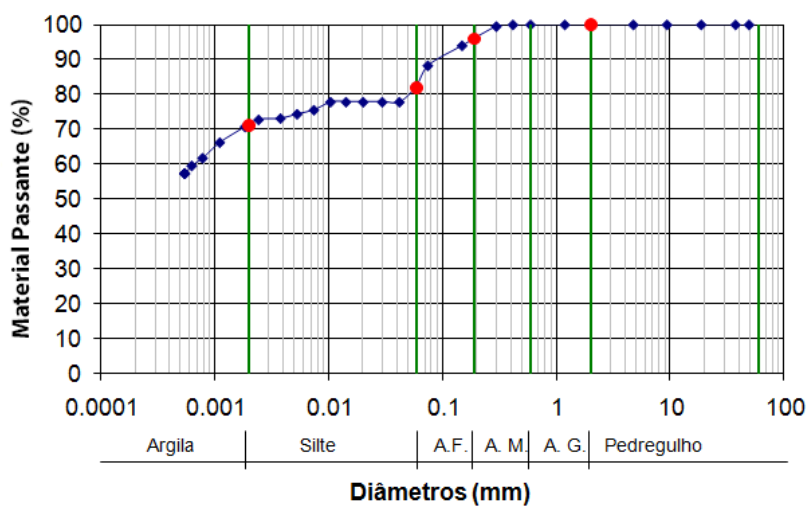


Figura 11. Curva granulométrica do solo.

Tabela 4. Caracterização geotécnica do solo.

Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Ps (g/cm ³)	W _{ot} (%)	γ _{d max} (kN/m ³)	TRB	USC	MCT
71	11	18	82	44	38	2,74	31,45	13,72	A-7-5(19)	MH	LG'

LL: Limite de liquidez; LP: Limite de plasticidade; IP: Índice de plasticidade; ρ_s: massa específica dos grãos; W_{ot}: teor de umidade ótimo; γ_{d max}: peso específico aparente seco máximo.

Segundo os resultados da Figura 11 e da Tabela 4, o solo em estudo é classificado geotecnicamente de acordo com a ABNT como argila areno-siltosa, com o *Unified Soil Classification* (USC) como silte de alta compressibilidade e pelo MCT (Miniatura Compacta Tropical) como solo argiloso laterítico.

A fração argila de 71% e o índice de plasticidade (IP) da ordem de 38% favorecem a ação da cal como agente de estabilização, considerando-se os mecanismos de reação das misturas solo-cal.

4.2 Compactação do solo e das misturas solo-cal

Na Figura 12, tem-se as curvas de compactação do solo e das misturas solo-cal confeccionadas nos teores de 1, 2, 3, 4 e 6% de cal em relação ao peso de solo seco e na Tabela 5 apresenta-se o quadro resumo dos seus respectivos parâmetros ótimos de compactação.

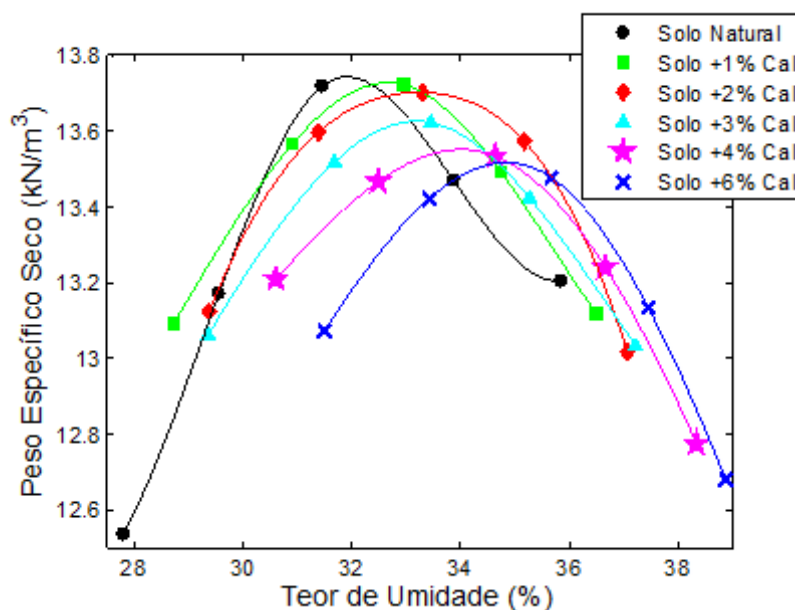


Figura 12. Curvas do ensaio de compactação dinâmica realizado no solo e nas misturas solo-cal.

Tabela 5. Parâmetros do ensaio de compactação realizado no solo e nas misturas solo-cal.

Solo	W _{ot} (%)	γ _{d max} (kN/m ³)
Solo Natural	31,45	13,72
Solo + 1% de cal	32,95	13,72
Solo + 2% de cal	33,30	13,70
Solo + 3% de cal	33,46	13,62
Solo + 4% de cal	34,24	13,53
Solo + 6% de cal	35,00	13,48

w_{ot}: Teor de umidade ótimo; γ_{d max}: Peso específico aparente seco máximo.

Através da Figura 12, observa-se o deslocamento das curvas de compactação para o lado direito no eixo das abscissas (teor de umidade) e a diminuição dos picos correspondentes ao peso específico aparente seco máximo no eixo das ordenadas. Isto se deve às reações ocorridas entre o solo e a cal, cujas trocas catiônicas promovem a conseqüente aglomeração-

floculação das partículas dos colóides de argila, a qual constitui a fração predominante da granulometria do solo pesquisado. A troca catiônica, devido à adição da cal, resulta em estabilização da camada de água intersticial e em redução considerável no tamanho desta. Quando as partículas de argila aproximam-se mais umas das outras ocorre o fenômeno da floculação, com partículas ligando-se no formato bordo-face. Isto ocorre devido à redução da dupla camada difusa e, conseqüentemente, do potencial eletroquímico ou potencial de Stern.

Na Tabela 5, observa-se que o solo apresenta teor ótimo de umidade de 31,45% e peso específico aparente seco máximo de 13,72 kN/m³, assim como verifica-se o acréscimo no teor de umidade, na faixa de 31,45 a 35% e decréscimo no peso específico aparente seco máximo, de 13,72 a 13,48 kN/m³, com o aumento do teor de cal empregado. Infere-se que a alteração das características de compactação do solo através da adição de cal reflete a sua nova natureza e evidencia as modificações produzidas pela cal nas suas propriedades físicas. Pesquisas têm mostrado que misturas solo-cal apresentam menor peso específico aparente seco máximo que o solo natural, para uma mesma energia de compactação (LIMA, 1981; TRB, 1987; MENDONÇA, 1998), com reduções que podem atingir valores da ordem de 5% (LIMA et al., 1993), sendo que ocorre aumento do teor ótimo de umidade com o incremento do teor de cal, notando-se inicialmente significativo acréscimo (2 a 3%).

Além do teor de cal, o tempo de cura inicial das misturas solo-cal também influencia as características de compactação. No presente trabalho, teve-se o cuidado de não permitir que a mistura curasse e ganhasse resistência antes da compactação, o que poderia ocasionar posteriores reduções na densidade aparente seca máxima e no teor de umidade ótimo. Quando isto ocorre, além da mistura se apresentar mais resistente e menos plástica do que o solo em seu estado natural, ela é também menos densa e reage de forma diferente aos incrementos de umidade (LIMA et al., 1993).

4.3 Compressão não confinada

4.3.1 Ensaios com cura tradicional

A Tabela 6 apresenta as médias dos resultados das resistências à compressão não confinada obtidas através dos ensaios de compressão não confinada do solo e das misturas solo-cal no estudo da cura tradicional, assim como os respectivos desvios padrão.

Tabela 6. Resultados da resistência à compressão não confinada de corpos de prova do solo natural e das misturas solo-cal com cura tradicional.

Resistencia à compressão não confinada (kPa)				
Período de Cura (dias)		Teor de Cal		
		2%	4%	6%
3	Média	546,40	787,46	1066,49
	Desvio Padrão	1,223	1,698	1,026
7	Média	607,16	881,36	1202,17
	Desvio Padrão	1,026	1,432	1,778
28	Média	859,05	1188,85	1598,24
	Desvio Padrão	0,816	0,623	1,631
90	Média	1198,01	1844,13	2626,10
	Desvio Padrão	3,321	3,168	1,869
Solo Natural	Média	358,27	Desvio Padrão	1,026

A Figura 13 apresenta as respectivas curvas de variação da resistência em função do período de cura das misturas solo-cal nos teores de 2, 4 e 6% de cal, na temperatura de cura de 22,8 °C, assim como a curva correspondente ao solo natural (SN).

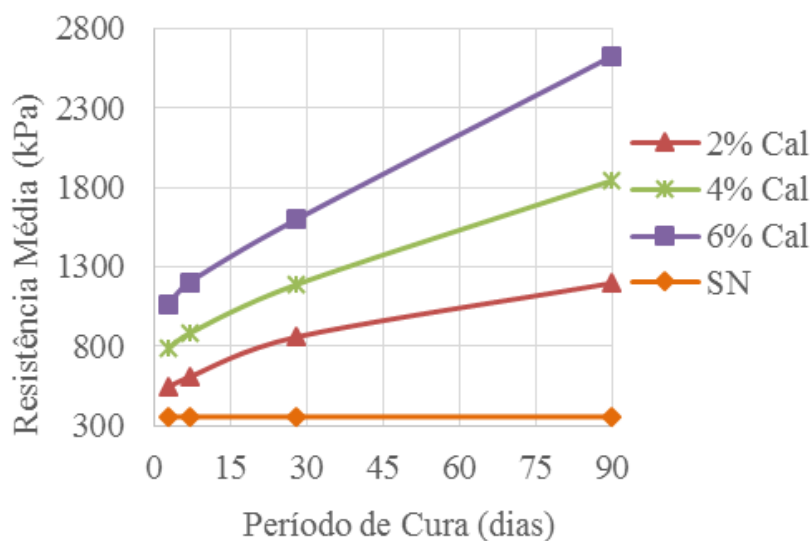


Figura 13. Cura tradicional das misturas solo-cal.

Pesquisas recentes (LOPES JUNIOR 2007, 2011; DALLA ROSA, 2009; SILVANI, 2013, 2017) relatam que para períodos de cura elevados o aumento do teor de cal aumenta a resistência à compressão não confinada linearmente. Como se observa na Tabela 6 e na Figura 13, há ganho de resistência mecânica com o aumento do teor de cal quando comparado ao solo natural ao longo dos períodos de cura. O ganho mais significativo refere-se ao teor de 6%

de cal e ao período de cura de 90 dias, com aumento de aproximadamente 733% de resistência mecânica média se comparado ao solo sem tratamento. Destacam-se, também, os ganhos de resistência mecânica das misturas nos períodos de cura de 3 e 7 dias, provavelmente relacionados ao desenvolvimento de reações pozolânicas nas misturas, mesmo nestes períodos de cura relativamente pequenos.

Estes ganhos de resistência mecânica média relacionam-se à ocorrência de reações pozolânicas entre a cal e o solo fino na presença da água, caracterizadas como de médio e longo prazo e que dão origem à formação do silicato hidratado de cálcio e/ou do aluminato de cálcio hidratado, através das reações entre a cal, a sílica e a alumina livre nas partículas de argila. A interação entre os íons cálcio e a fração argila provoca a dissolução da sílica e da alumina das partículas do solo em um ambiente de pH elevado. Os íons dissolvidos se combinam com os íons de cálcio e formam-se os agentes cimentantes que se interligam nas partículas argilosas, sendo responsáveis por aumentos de resistência mecânica.

A Figura 14 corresponde aos corpos de prova do solo natural e das misturas solo-cal ensaiados com três dias de cura. Em todos os corpos de prova pode-se observar a linha de ruptura bem definida. Em A tem-se o solo natural, em B, C, D, respectivamente, as misturas solo-cal com 2, 4 e 6% de teor de cal. Infere-se ainda que, com apenas três dias de cura, o solo já apresenta ganhos elevados de resistência mecânica, principalmente o correspondente ao maior teor de cal analisado, quando comparado ao solo natural.



Figura 14. . Corpos de prova ensaiados com 3 dias de cura: (A) solo natural; (B) solo + 2% de cal; (C) solo + 4% de cal; e (D) solo + 6% de cal.

CNC: compressão não confinada; 17-001: corpo de prova número 1; CT :cura tradicional.

4.3.2 Ensaios com cura acelerada

Na Tabela 7, mostram-se as médias dos resultados das resistências à compressão não confinada provenientes dos ensaios de compressão não confinada realizados no solo e nas misturas solo-cal, assim como os respectivos desvios padrão para cada um dos períodos e temperaturas ensaiados com cura acelerada.

Tabela 7. Resultados da resistência à compressão não confinada de corpos de prova do solo natural e das misturas solo-cal com cura acelerada.

Resistência à compressão não confinada (kPa)							
Temperatura de Cura (°C)	Período de Cura (horas)	Teor de Cal					
		2%		4%		6%	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
10	12	464,99	1,079	527,08	0,235	682,41	0,623
	24	512,77	1,698	620,32	0,408	713,05	2,622
	48	576,36	0,816	661,10	0,623	788,80	2,053
	96	596,51	0,623	706,72	1,631	830,08	0,816
30	12	467,98	0,816	690,90	0,623	757,00	1,246
	24	516,60	1,246	704,06	2,053	880,69	1,432
	48	581,69	1,026	812,94	1,311	1176,70	1,470
	96	602,33	0,816	992,24	1,698	1381,97	1,470
40	12	505,61	1,246	703,89	0,623	899,17	0,623
	24	537,74	0,235	731,53	1,246	1082,14	0,849
	48	763,16	0,408	926,31	0,623	1179,03	1,246
	96	903,00	1,079	1171,87	1,026	1585,75	1,470
50	12	646,79	0,816	791,79	1,026	924,48	1,631
	24	687,91	0,471	924,81	0,623	1138,91	1,026
	48	978,59	2,093	1301,23	0,623	1455,73	0,623
	96	1328,7	1,026	1742,91	2,653	2271,49	0,816
Solo Natural		Média:	358,27	Desvio Padrão:	1,026		

Nas Figuras 15 a 17, têm-se as respectivas curvas de variação das resistências à compressão não confinada em função do período de cura acelerada (12, 24, 48 e 96 horas) das misturas solo-cal, com teores de cal de 2, 4 e 6%, após a manutenção dos corpos de prova nas temperaturas de cura de 10, 30, 40 e 50 °C, assim como a curva correspondente ao solo natural (SN) na temperatura de 22,8°C.

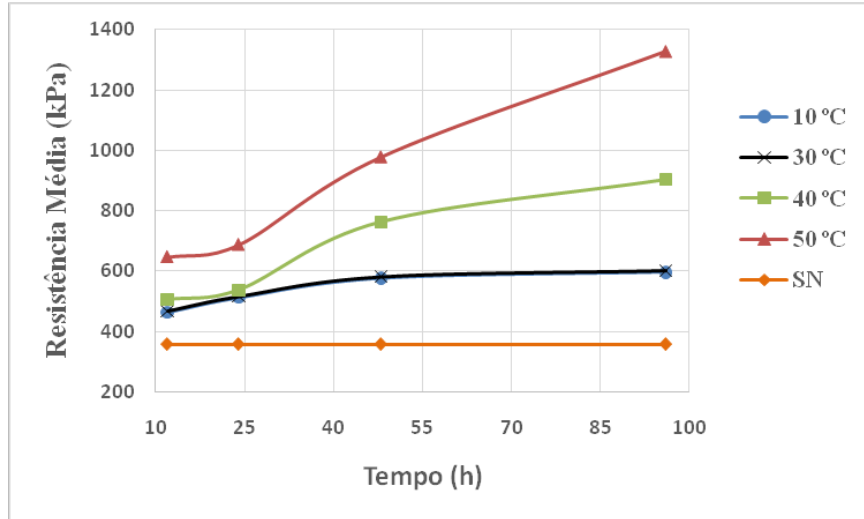


Figura 15. Cura acelerada das misturas solo-cal no teor de 2% de cal.

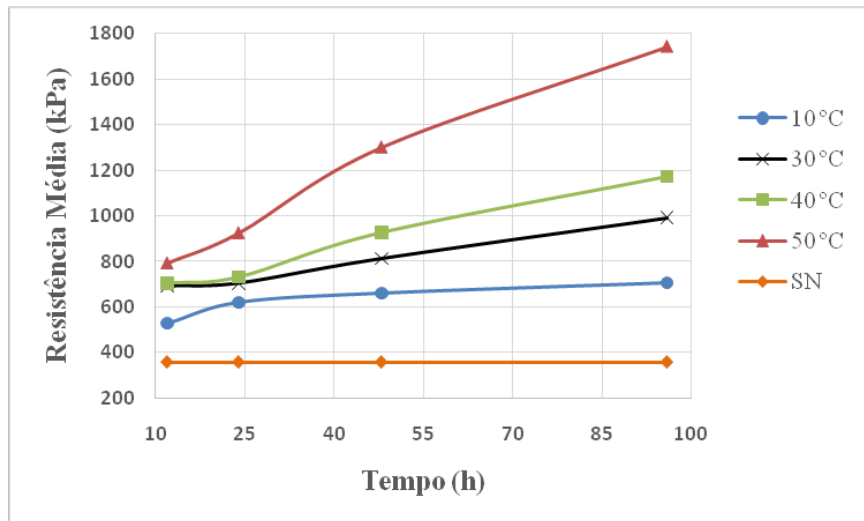


Figura 16. Cura acelerada das misturas solo-cal no teor de 4% de cal.

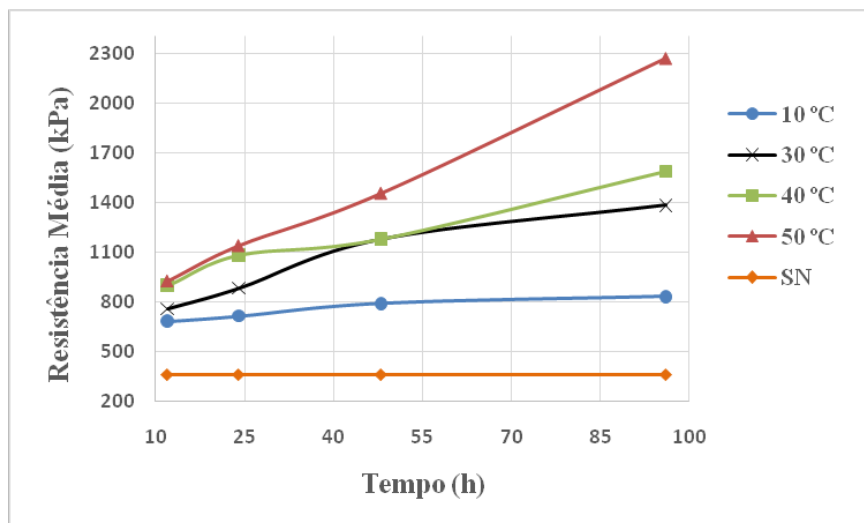


Figura 17. Cura acelerada das misturas solo-cal no teor de 6% de cal.

Como se observa nas Figuras 15 a 17, o teor de cal tem um efeito considerável sobre a resistência à compressão não confinada do material, tanto para corpos de prova ensaiados em baixos períodos de cura acelerada e temperaturas quanto para aqueles a altos períodos de cura acelerada e temperaturas.

O ganho de resistência mecânica média mais expressivo refere-se ao teor de 6% de cal, à temperatura de cura de 50 °C e ao período de cura de 96 horas, com aumento de aproximadamente 634% de resistência mecânica média se comparado ao solo sem tratamento. Em nível comparativo, para o mesmo teor de 6% de cal, no procedimento de cura tradicional, a 22,8°C, obter-se-ia ganho de resistência similar a este somente no período de aproximadamente 65 dias de cura. Sante et al. (2014), ao estudarem uma argila de alta plasticidade estabilizada com 5% de cal calcítica hidratada, relatam que os efeitos da estabilização solo-cal são geralmente observados após 28 dias ou mais de cura, podendo ser acelerado pelo aumento da temperatura ao longo do período de cura.

Estes ganhos de resistência dos ensaios de compressão não confinada estão relacionados às reações pozolânicas. Quando a temperatura é aumentada aceleram-se as reações pozolânicas que aumentam os valores de resistência mecânica em um menor período de cura. Por se tratarem de reações endotérmicas, verifica-se que a taxa de desenvolvimento da resistência é maior quanto maior a temperatura de cura. Estudos recentes mostram que aumentando a temperatura de cura de 20 a 50 °C a taxa de reação pozolânica é multiplicada por seis (6) (AL-MUKHTAR et al., 2010a,b).

Ao se comparar a temperatura de cura de 50 °C e o período de cura de 96 horas, períodos mais propícios à ocorrência das reações pozolânicas, observa-se o aumento do ganho de resistência com os teores crescentes de cal. Nestas condições, com o incremento de apenas 2% de quantidade de cal em cada mistura, verificam-se ganhos de resistência mecânica média da ordem de 131% entre os teores de 2 e 4%, assim como de 130% entre os teores de 4 e 6%.

Para todos os teores de cal analisados, verifica-se ganhos de resistência, em função do período e da temperatura de cura, exceto para a temperatura de 40 °C que, nos teores de 2 e 4% de cal e cura de 12 e 24h, resultou em um incremento muito pequeno de resistência, assim como nos períodos de 24 e 48h de cura no teor de 6% de cal, se aproximando muito dos valores encontrados nas mesmas condições para a temperatura de 30 °C. Tal fato pode ser explicado pela possível diminuição da solubilidade do composto químico Ca(OH)_2 , cal

hidratada. Segundo Thompson (1966), um ponto negativo do aumento da temperatura é que a solubilidade da cal hidratada diminui à medida que a temperatura aumenta.

Verifica-se um ganho mínimo de resistência mecânica da mistura solo-cal ensaiada na temperatura 10 °C com relação ao solo natural na temperatura de 22,8 °C. A temperatura de 10 °C apresenta menores valores de resistência mecânica quando comparadas às de 30, 40 e 50 °C, sendo que isto se deve ao fato de que temperaturas muito baixas limitam as reações pozolânicas que, neste caso, tendem a se desenvolverem de forma mais lenta que em temperatura ambiente. Em especial, refere-se aos ganhos mínimos de resistência mecânica em todas as misturas após o período de cura de 48 horas e temperatura de cura de até 40 °C.

O ganho de resistência das misturas também pode estar relacionado à mineralogia do solo residual maduro em análise. Velten (2008) realizou a caracterização mineralógica deste mesmo solo e, através do ensaio de difração de raios-X, verificou, na lâmina da fração argila, que o mesmo apresenta a caulinita como principal mineral na sua composição, sendo esta, também, o principal mineral secundário encontrado em solos tropicais. Também foram encontradas expressivas quantidades de óxidos de ferro e alumínio, respectivamente, hematita e gibbsita, que conferem ao solo alto poder de adsorção específica de cátions, além de alto grau de cimentação e agregação natural. A presença de hematita é associada à sua coloração mais avermelhada, que é uma característica marcante que este mineral confere aos solos, devido ao seu alto poder de pigmentação. Geralmente, é encontrada em ambientes que possuem alta taxa de liberação de ferro, baixa quantidade de matéria orgânica, pH alto e em solos de locais mais quentes e com baixa umidade.

4.3.3 Deformação

Na Tabela 8, têm-se as médias dos resultados das deformações axiais na ruptura obtidas através dos ensaios de compressão não confinada realizados em três corpos de prova (três repetições) do solo e das misturas solo-cal, assim como os respectivos desvios padrão para cada um dos períodos ensaiados com cura tradicional.

Tabela 8. Deformação axial na ruptura e desvio padrão de cada ensaio com cura tradicional.

Deformação axial na ruptura ($\epsilon_{a\text{rup}}$)				
Período de Cura (dias)		Teor de Cal		
		2%	4%	6%
3	Média	2,19	2,12	2,41
	Desvio Padrão	0,109	0,141	0,156
7	Média	2,93	2,91	2,97
	Desvio Padrão	0,396	0,365	0,405
28	Média	2,05	1,99	2,10
	Desvio Padrão	0,018	0,024	0,022
90	Média	2,65	2,57	2,05
	Desvio Padrão	0,16	0,113	0,105
Solo Natural	Média	3,81	Desvio Padrão	0,001

Ressalta-se que, todos os ensaios foram realizados com três repetições e, para a confecção dos gráficos das curvas médias tensão-deformação, utilizou-se o ajuste polinomial. Cada teor de cal está relacionado a um período e a uma temperatura de cura. Diante disto, se obteve três curvas tensão-deformação (três repetições) e a partir destas calcularam-se as curvas de aproximação que se encontram no Anexo A. Estas foram utilizadas na confecção dos gráficos das figuras a seguir.

A Figura 18 apresenta os resultados das curvas tensão-deformação para os ensaios de compressão não confinada com cura tradicional. Verifica-se a ocorrência de maiores deformações para valores elevados de tensão. Via de regra, a evolução do parâmetro de deformabilidade depende, essencialmente, do teor de cal e do tempo de cura. Observa-se que o solo natural (SN) apresenta curva tensão-deformação típica de solos finos, com comportamento dúctil e ruptura por deformação excessiva.

O efeito da cal nas características de deformabilidade das misturas solo-cal é notado através do aumento da tensão de ruptura e diminuição da deformação na ruptura. Thompson (1975) afirma que através da análise da curva tensão-deformação das misturas solo-cal revela-se o seu comportamento frágil.

A Tabela 9 apresenta as médias dos resultados das deformações axiais na ruptura obtidas através dos ensaios de compressão não confinada do solo e das misturas solo-cal, assim como os respectivos desvios padrão no processo de cura acelerada.

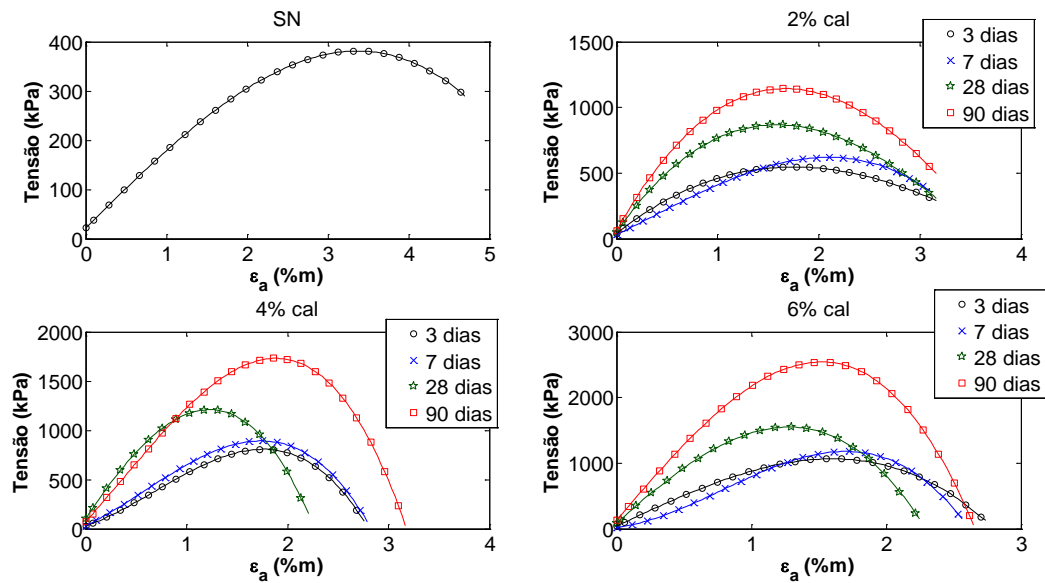


Figura 18. Curvas tensão-deformação para os ensaios de compressão não confinada em corpos de prova do solo natural e das misturas solo-cal com cura tradicional.

Tabela 9. Deformação axial na ruptura e desvio padrão de cada ensaio com cura acelerada.

Deformação axial na ruptura ($\epsilon_{a\text{rup}}$)							
Temperatura de Cura ($^{\circ}\text{C}$)	Período de Cura (horas)	Teor de Cal					
		2%		4%		6%	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
10	12	2,48	0,085	3,44	0,268	5,22	0,274
	24	4,77	0,865	3,81	0,018	4,18	0,042
	48	4,32	0,768	3,34	0,042	5,21	0,636
	96	4,57	0,529	3,73	0,025	3,94	0,042
30	12	2,35	0,019	2,94	0,162	3,86	0,042
	24	3,43	0,409	3,88	0,042	3,49	0,042
	48	3,87	0,537	3,34	0,665	3,04	0,036
	96	2,60	0,330	2,81	0,598	3,14	0,029
40	12	2,81	0,038	2,39	0,174	2,81	0,058
	24	2,80	0,09	2,3	0,098	1,99	0,042
	48	2,66	0,042	3,15	0,042	2,27	0,047
	96	2,36	0,032	2,63	0,035	2,58	0,036
50	12	2,75	0,042	2,60	0,137	3,08	0,410
	24	2,56	0,082	2,63	0,096	3,88	0,395
	48	3,40	0,074	3,14	0,085	2,79	0,207
	96	2,80	0,065	2,95	0,099	3,01	0,196
Solo Natural		Média:		Desvio Padrão:		0,001	

As Figuras 19 a 21 representam, respectivamente, os gráficos das curvas tensão-deformação dos ensaios de compressão não confinada com cura acelerada nos teores de 2, 4 e 6% de cal. Nota-se que, as deformações são influenciadas pelos teores de cal, períodos de cura e temperaturas de cura.

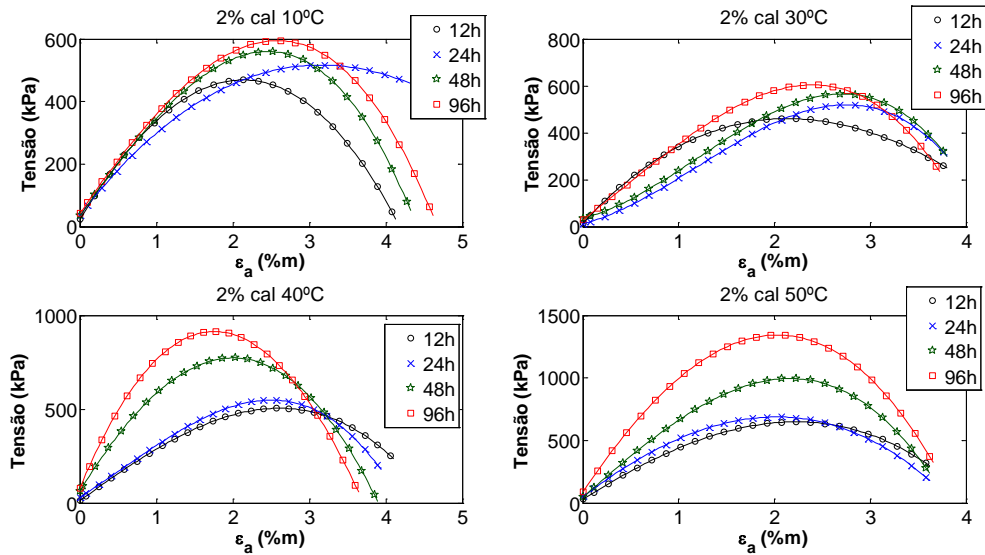


Figura 19. Curvas tensão-deformação dos ensaios de compressão não confinada em corpos de prova das misturas solo-cal no teor de 2% de cal.

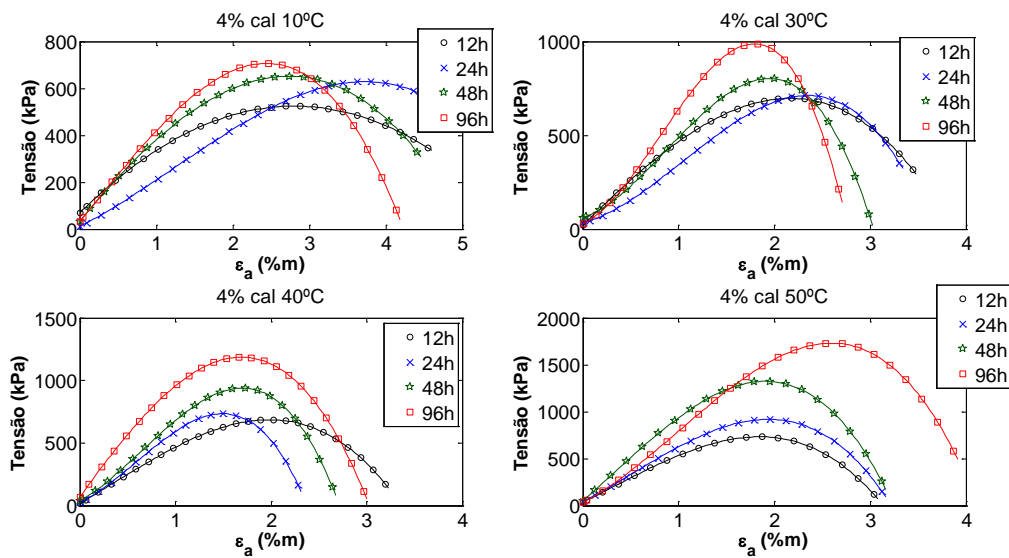


Figura 20. Curvas tensão-deformação dos ensaios de compressão não confinada em corpos de prova das misturas solo-cal no teor de 4% de cal.

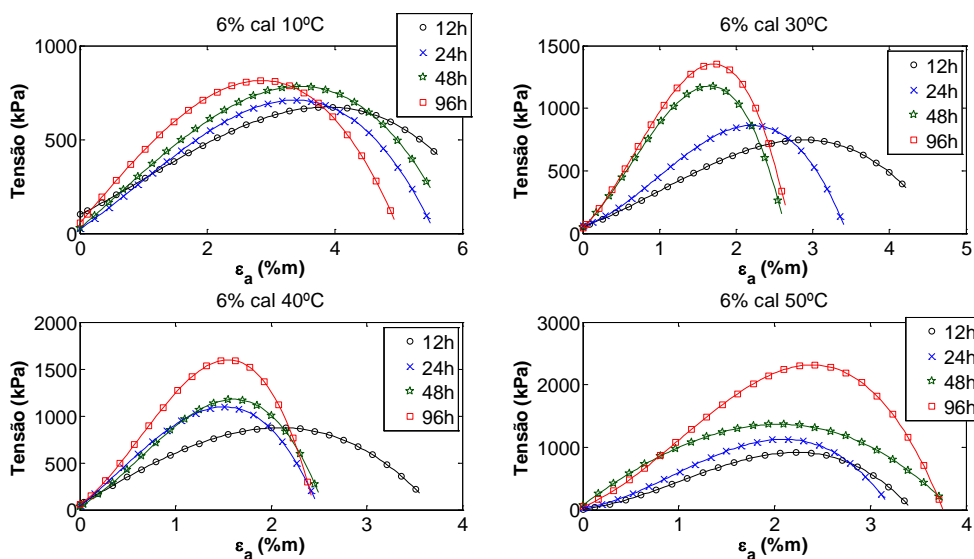


Figura 21. Curvas tensão-deformação dos ensaios de compressão não confinada em corpos de prova das misturas solo-cal no teor de 6% de cal.

Através das curvas tensão-deformação mostradas nas Figuras 19 a 21, observa-se um comportamento inicialmente rígido, seguido de um aparentemente linear, até um ponto de plastificação bem definido, com aumento nas deformações plásticas até a ruptura das misturas solo-cal. Outra característica relevante a ser observada é a marcante fragilidade na ruptura. Tal fragilidade aumenta com o acréscimo da quantidade de agente estabilizante e diminui com o aumento da tensão efetiva média (SCHNAID et al., 2001).

Para ambos os tipos de cura, tradicional e acelerada, observa-se que o aumento da quantidade de cal, para um mesmo período de cura, provoca aumento da resistência de pico e diminuição da deformação na qual o pico é atingido.

Analisando as relações tensão-deformação obtidas em ensaios de compressão não confinada realizados em um solo residual granítico, cuja ruptura é típica de um material dúctil, e suas misturas solo-cal, Cristelo e Jalali (2002) concluíram que essa ductilidade tornou-se inversamente proporcional ao período de cura e ao teor de cal utilizado.

No estudo realizado por Alcântara et al. (1997) foram obtidas curvas de tensão-deformação a partir de ensaios triaxiais não consolidados não drenados de um solo que apresentava um comportamento essencialmente dúctil, para diferentes tempos de cura. Os autores verificaram que, com a adição de cal e com o aumento do período de cura da mistura, o solo sofreu mudanças nos seus parâmetros elásticos, caminhando para um comportamento frágil relacionado ao desenvolvimento das reações pozolânicas.

4.4 Permeabilidade

Na Tabela 10, têm-se as médias dos resultados dos ensaios de permeabilidade realizados em corpos de prova, com três repetições, do solo e das misturas solo-cal, assim como os respectivos desvios padrão para cada um dos períodos de cura ensaiados.

Tabela 10. Coeficiente de permeabilidade a 20 °C (k_{20}) e desvio padrão de cada ensaio.

Coeficientes de Permeabilidade, k_{20} ($\times 10^6 \text{ cm.s}^{-1}$)				
Período de Cura (dias)		Teor de Cal		
		2%	4%	6%
3	Média	2,86	3,52	5,06
	Desvio Padrão	0,43	1,01	0,95
7	Média	3,70	7,88	10,39
	Desvio Padrão	1,13	0,71	2,78
28	Média	1,39	1,59	2,64
	Desvio Padrão	0,57	0,54	0,42
90	Média	1,35	1,52	2,49
	Desvio Padrão	0,03	0,02	0,04
Solo Natural	Média	0,26	Desvio Padrão	0,01

De acordo com a literatura, não há informação conclusiva sobre o efeito do teor de cal nos parâmetros dos ensaios de permeabilidade, sendo comum se afirmar que a permeabilidade de um solo aumenta com a adição de cal, devido ao fenômeno das reações de troca catiônica com a conseqüente floculação-aglomeração de suas partículas mais finas. De um modo geral, afirma-se que, a estabilização com cal de um solo essencialmente argiloso aumenta o valor do coeficiente de permeabilidade, enquanto que em solos mais granulares produz o efeito contrário, isto é, induz a diminuição do coeficiente de permeabilidade (CRISTELO, 2001; SILVA, 2010).

Na Figura 22, são apresentados os resultados dos coeficientes de permeabilidade das misturas solo-cal em função dos períodos de cura, assim como, a curva correspondente ao solo natural (SN). Observa-se que a permeabilidade do solo estabilizado com cal permanece mais elevada do que a do solo natural, sendo que, com o aumento do teor de cal, ocorrem aumentos nos valores dos coeficientes de permeabilidade de 3 a 7 dias de cura e diminuições nos períodos de 7 a 90 dias de cura em comparação ao solo natural.

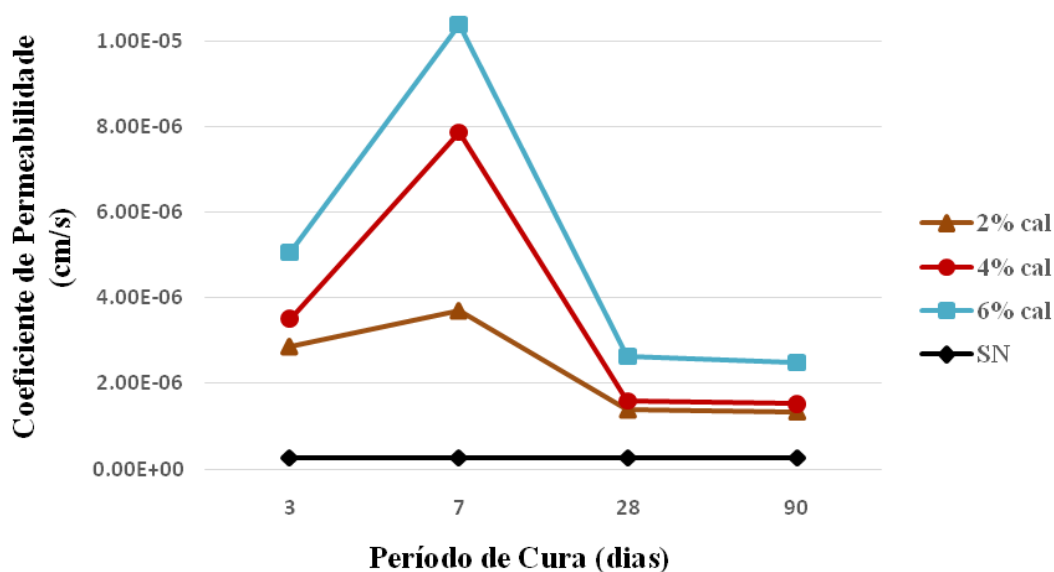


Figura 22. Coeficientes de permeabilidade do solo e das misturas solo-cal em função do período de cura.

Verifica-se através da Figura 22 que, ao se promover a criação de uma estrutura agregada mais porosa, com índice de vazios maior através das reações de troca catiônica, o solo apresenta uma permeabilidade crescente até os 7 dias de cura. Contudo, nos períodos de 7 a 90 dias, com o aumento dos teores de cal e períodos de cura, constata-se a influência significativa das reações pozolânicas, que leva à diminuição da permeabilidade.

Como já referido anteriormente, associa-se esta diminuição à ocorrência de reações pozolânicas em que a ação de cimentação da cal produz um gel, pela reação da sílica e da alumina com íons Ca^{2+} , que preenche os poros do solo, reduzindo o seu índice de vazios e constituindo-se em um obstáculo à percolação da água. Por outro lado, outra explicação pode ser dada pelas reações de carbonatação que resultam na precipitação do carbonato de cálcio nos poros do solo (SILVA, 2010).

Além disso, verifica-se que, no período de 28 a 90 dias, não ocorrem mudanças significativas no valor do coeficiente de permeabilidade, que permanece praticamente constante. Isto poder ser devido ao fato de que o consumo de cal no sistema pode ter sido estabilizado durante o processo das reações químicas, minimizando assim, os efeitos da continuidade da ocorrência das reações pozolânicas.

Al-Mukhtar et al. (2010a), ao estudarem uma argila chamada Impersol com 2, 4, 6, 8, 10 e 20% de cal, observaram que, mesmo com 90 dias de cura, a cal não é totalmente consumida e que há um maior consumo de cal no primeiro mês de cura. Para períodos maiores de cura os autores perceberam uma tendência de estabilização no consumo da cal. Por

outro lado, Sante et al. (2014) no estudo de uma argila de alta plasticidade estabilizada com 5% de cal calcítica hidratada, verificaram que, após 70 dias de cura ocorreu o cessamento das reações através da diminuição da concentração de cátions e do pH da mistura solo-cal. Os autores ainda relatam que após os primeiros 7 dias de cura, as reações de troca catiônica são completamente finalizadas e então iniciam-se as reações pozolânicas.

Em relação à sequência e duração das reações, após a mistura solo-cal, estima-se que a reação de troca de catiônica se desenvolva dentro de alguns dias, geralmente 24 a 72 horas (SMITH, 1996) até 96 horas (WINTERKORN; PAMUKCU, 1991). Referindo-se às reações pozolânicas, Boardman et al. (2001) apontam que estas ocorrem apenas após os primeiros 7 dias de cura, enquanto que Sante et al. (2014) afirmam que é possível identificar um intervalo de tempo de 3 a 30 dias para o desenvolvimento da maior parte das reações de cimentação.

Com base em pesquisas realizadas, tem-se que: (i) Benetti (2015) relata que a permeabilidade de todas as amostras tratadas com cal aumentou, para o período de cura de até 14 dias, e diminuiu, para período de cura superior a este valor; (ii) Khattab et al. (2007) referem que o coeficiente de permeabilidade aumentou inicialmente até um valor máximo, a partir do qual diminuiu até atingir um valor constante ao fim de 42 dias, em estudo realizado com um solo bentonítico estabilizado com cal e; (iii) Sante et al. (2014) no estudo de uma argila com 5% de cal, comentam que a permeabilidade diminuiu significativamente com o aumento do período de cura em condição da amostra insaturada.

Na Figura 23 o coeficiente de permeabilidade obtido a 20 °C (k_{20}), em cm/s, também é apresentado em função da relação de volume de poros percolados. Nesta figura, são apresentadas todas as leituras dos ensaios para cada teor de cal e período de cura. A mistura solo-cal com 6% de teor de cal no período de cura de 7 dias é a que apresenta maior valor de volume de poros devido à estrutura da mistura compactada apresentar-se mais flokulada como já explicitado. Constata-se que quanto maior o período de cura menor é a quantidade de poros existente na estrutura.

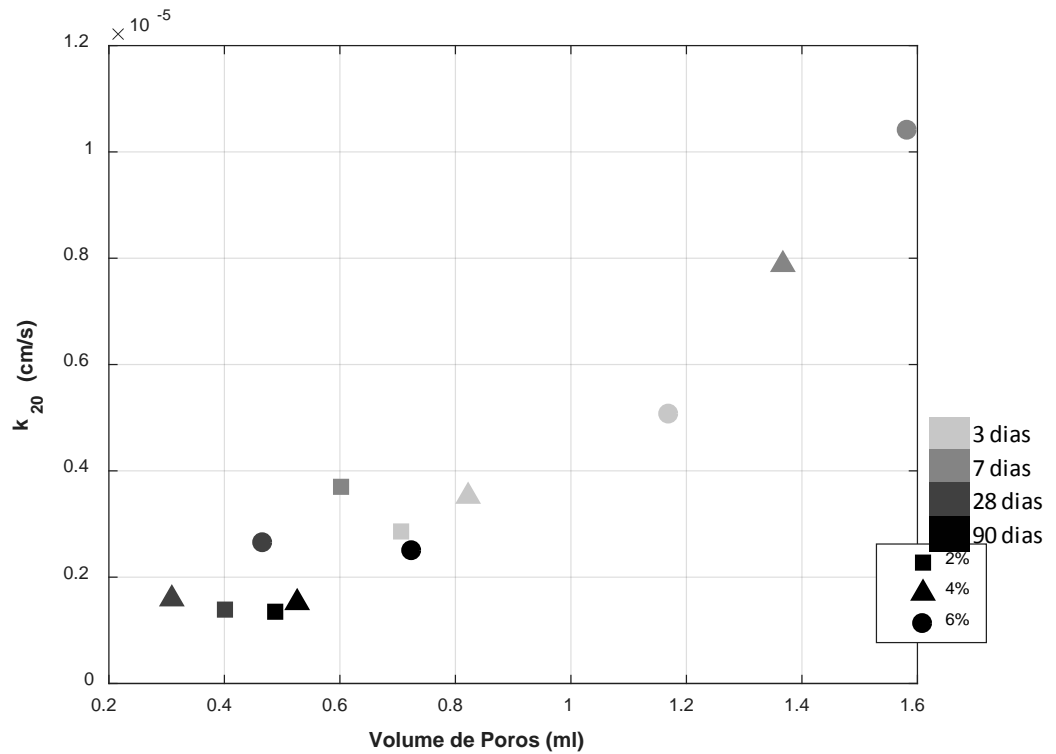


Figura 23. Coeficientes de permeabilidade (k_{20}) em função do volume de poros das misturas solo-cal.

A Figura 24 ratifica os resultados apresentados na Figura 23 através das oscilações do volume de poros com o período de cura, sendo crescentes os volumes de 3 a 7 dias e de 28 a 90 dias de cura. Porém, de 28 a 90 dias, a taxa de crescimento da quantidade de volume de poros ocorreu com menor intensidade, devido, provavelmente, ao término das reações pozolânicas através do consumo da cal nas reações químicas ocorridas.

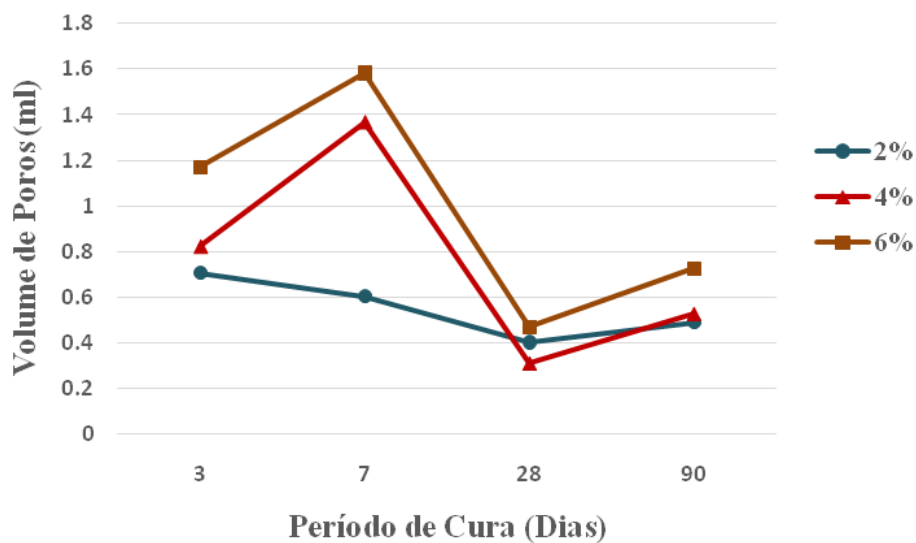


Figura 24. Volume de poros em função do período de cura das misturas solo-cal.

4.5 Compressibilidade

Na Figura 25, ilustram-se as etapas de realização do ensaio CRD, englobando os corpos de prova do solo e/ou das mistura solo-cal após a sua confecção (Figura 25a), após a realização do ensaio (Figura 25b) e após a secagem em estufa, para a obtenção dos parâmetros de umidade e índice de vazios (Figura 25c), com destaque para a sua variação de volume.

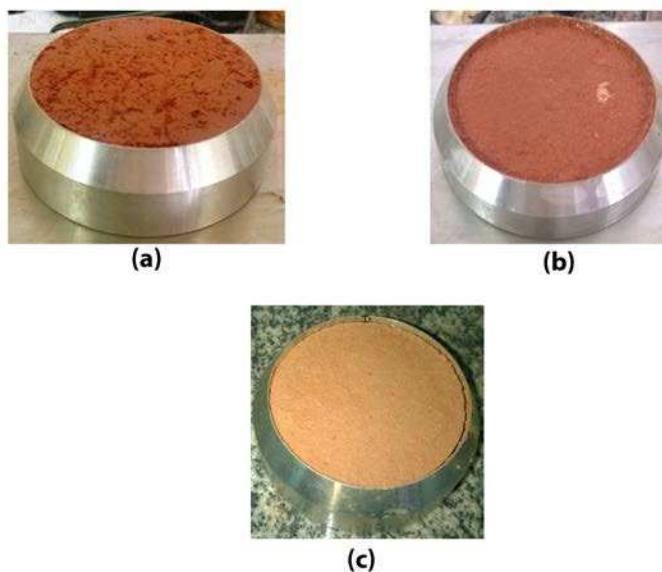


Figura 25. Corpos de prova do ensaio de adensamento CRD: (a) antes do ensaio; (b) após ensaio e (c) após secagem em estufa.

Na Figura 26, apresentam-se os resultados dos ensaios de adensamento CRD na forma de curvas de variação do índice de vazios com a tensão vertical efetiva (curvas de adensamento), em escala logarítmica (e *versus* $\log \sigma'_v$), para o solo no estado natural (SN) e para as misturas solo-cal, considerando-se, respectivamente, a influência dos teores de cal de 1, 2, 3 e 4% (Figuras 26a a 26d) e dos períodos de cura de 7, 28, 90 e 180 dias (Figuras 26e a 26h).

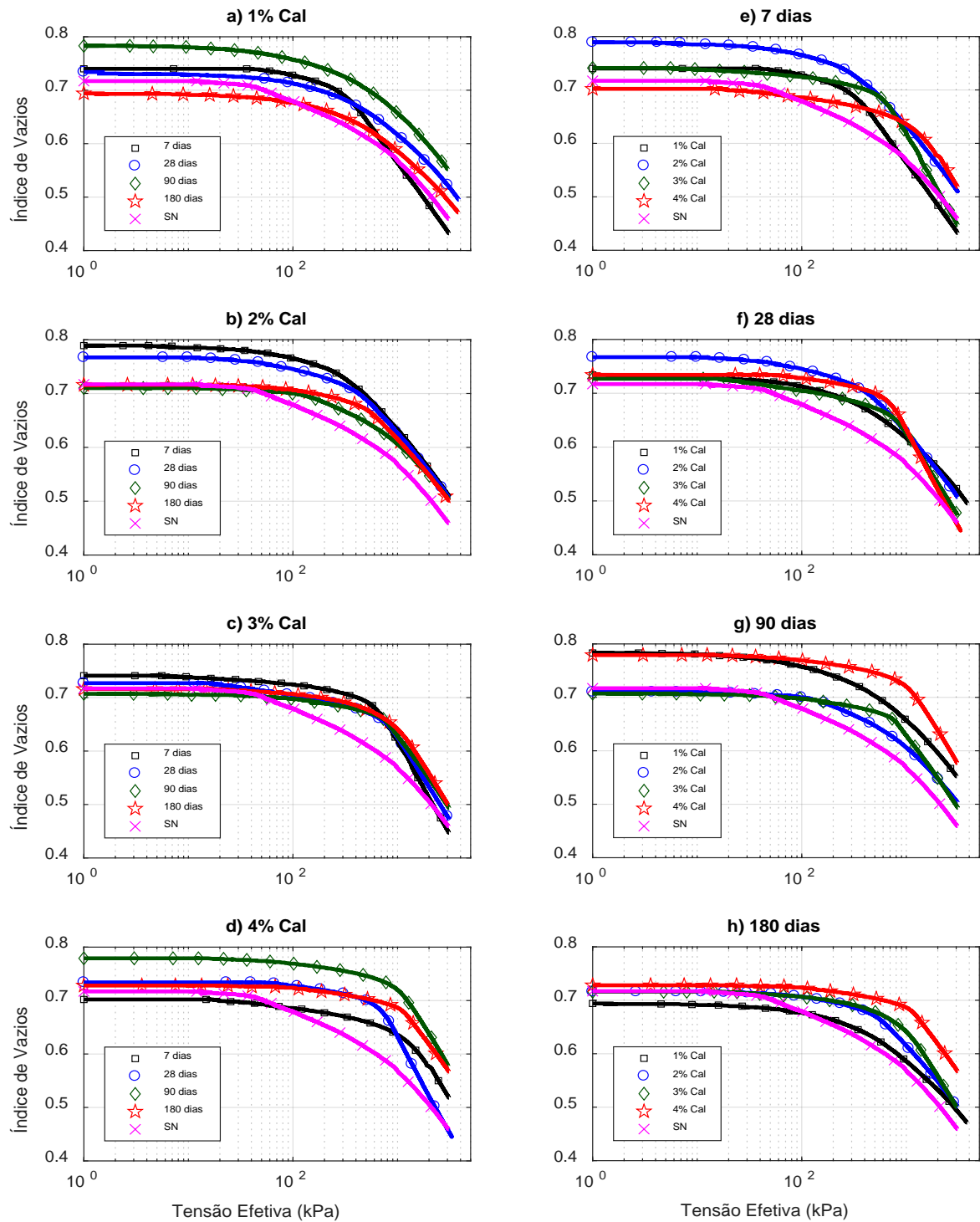


Figura 26. Curvas de adensamento do solo e das misturas solo-cal: a, b, c e d para diferentes teores de cal; e, f, g e h para diferentes períodos de cura.

Como pode ser observado na Figura 26, as curvas de adensamento deslocam-se para a direita no eixo das abscissas (eixo das tensões verticais efetivas), para aumentos no teor de cal e no período de cura, comportamento este que se acentua com o aumento do nível de tensão vertical efetiva. Isto pode ser constatado, por exemplo, através da análise visual da distância entre as curvas correspondentes ao solo natural e às misturas solo-cal, para o teor de cal de 4% (Figura 26d) e o período de cura de 180 dias (Figura 26h). Notam-se, também, nestes deslocamentos, quedas na variação da tensão vertical efetiva para uma mesma taxa de variação de índice de vazios. Tal fato pode ser explicado através do desenvolvimento de reações pozolânicas, responsáveis pelo aumento da rigidez e, conseqüentemente, pela diminuição da compressibilidade das misturas solo-cal, que são diretamente dependentes do teor de cal e do período de cura das misturas.

O teor de 1% de cal apresenta inconsistências quando comparado aos demais teores em relação aos parâmetros obtidos no ensaio de adensamento CRD. Por exemplo, para tensões verticais efetivas elevadas, na Figura 26a tem-se a curva correspondente ao período de 7 dias de cura com comportamento menos rígido do que aquela do solo natural. Por se tratar de um teor de cal relativamente pequeno, podem ocorrer locais preferenciais de acúmulo de cal nas amostras no momento da homogeneização da mistura solo-cal para a confecção dos corpos de prova a serem ensaiados, o que se pode refletir na resposta mecânica diferenciada desta mistura. Este comportamento pode ser observado, por exemplo, nas curvas correspondentes ao teor de 1% de cal (Figura 26a) onde a curva correspondente a 180 dias de cura deveria estar mais a direita no eixo das abscissas, com variação de intervalo menor de tensão vertical efetiva.

A Tabela 11 traz os resultados dos parâmetros e_o , C_c , C_r e σ'_{vm} provenientes das curvas obtidas no ensaio CRD, que foram apresentadas na Figura 26. Os valores da tensão de pré-adensamento, σ'_{vm} , em kPa, foram estimados pelo método de Casagrande (1936). Os valores dos índices de compressão e recompressão, respectivamente C_c e C_r , foram obtidos através das declividades das curvas e *versus* $\log \sigma'_v$, localizados na posição entre 10^3 e 2×10^3 kPa no eixo das abscissas.

Tabela 11. Parâmetros obtidos através do ensaio de adensamento CRD.

Teor de Cal (%)	Período de Cura (dias)	e_0	C_c	$C_r (10^{-3})$	σ'_{vm} (kPa)
1	7	0,80	0,274	1,877	251,67
	28	0,80	0,266	1,432	348,21
	90	0,76	0,250	1,203	379,21
	180	0,70	0,232	1,025	392,73
2	7	0,79	0,270	1,564	331,61
	28	0,79	0,264	1,125	360,71
	90	0,72	0,244	1,049	455,82
	180	0,72	0,242	0,917	485,82
3	7	0,78	0,262	1,267	566,99
	28	0,77	0,242	1,016	636,78
	90	0,75	0,223	0,876	672,07
	180	0,71	0,216	0,740	693,55
4	7	0,79	0,203	1,048	596,78
	28	0,78	0,196	0,879	659,58
	90	0,74	0,188	0,592	837,39
	180	0,74	0,163	0,319	859,09
Solo Natural		0,76	0,284	2,163	250,66

Na Tabela 11, observa-se também que as tensões de pré-adensamento aumentam e os índices de vazios iniciais e os de compressão e recompressão diminuem com o aumento do teor de cal e do período de cura. Estes resultados indicam que a adição no teor de cal e o aumento no período de cura das misturas resultam em aumentos na rigidez e diminuições na compressibilidade, que estão relacionados com o desenvolvimento de reações pozolânicas.

A Figura 27 mostra o comportamento da tensão de pré-adensamento das misturas solo-cal em função dos incrementos dos teores de cal. Na curva correspondente ao período de cura de 180 dias, no teor de 4% de cal, observa-se que ocorreu o aumento mais expressivo na tensão de pré-adensamento, de aproximadamente 243% em relação ao solo natural (SN), embora em valor próximo do que se observou para o período de 90 dias. Esta constatação pode ser um indicativo de que entre 90 e 180 dias, houve um decréscimo significativo na taxa de ganho de resistência mecânica devido ao desenvolvimento de reações pozolônicas ou pode representar uma limitação deste método de ensaio para a análise da compressibilidade de materiais cimentados. Além deste, refere-se ao ganho expressivo no valor da tensão de pré-adensamento entre os teores de cal de 1 e 4%, no período de cura de 7 dias, quando se observou aumento de 137%.

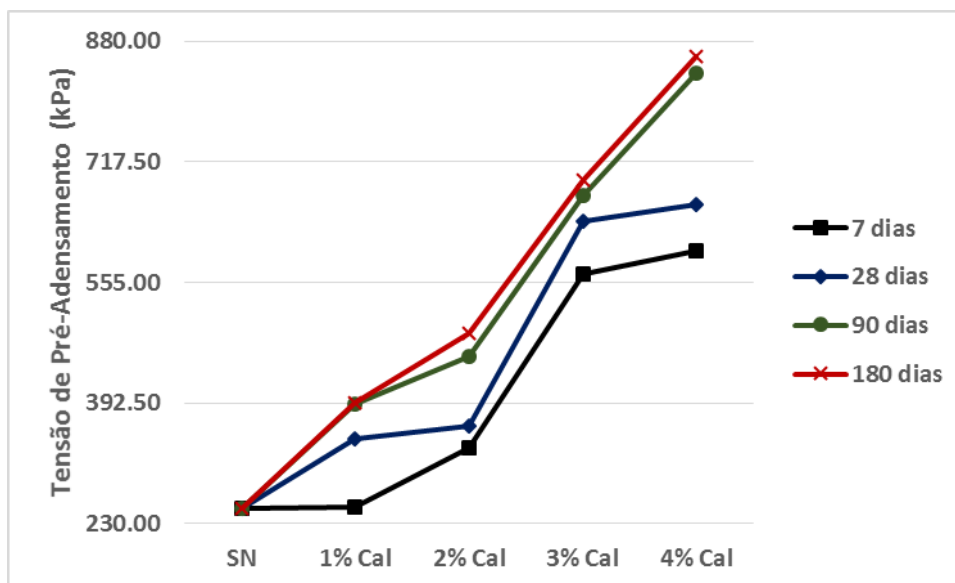


Figura 27. Tensão de pré-adensamento obtida no ensaio de adensamento CRD.

As Figuras 28 e 29 apresentam os índices de compressão e recompressão, respectivamente, em função dos teores de cal. Através destas curvas, como também pelas suas formulações, percebe-se que C_c e C_r estão diretamente relacionados entre si. Com a diminuição dos vazios da amostra, devido ao desenvolvimento de reações pozolânicas ao longo dos períodos de cura e intensificadas pelos crescentes teores de cal, houve aumento na resistência mecânica e redução na compressibilidade das misturas. Estes resultados corroboram com aqueles encontrados nos ensaios de compressão não confinada (Tabela 6 e Figura 13) e permeabilidade (Tabela 10 e Figura 22) descritos nesta pesquisa.

Observa-se também, na Tabela 11 e nas Figuras 26 e 28, o deslocamento dos valores do índice de compressão (C_c) para o lado direito do eixo logarítmico da tensão vertical efetiva, indicando que, à medida que ocorrem os incrementos de cal e aumentam-se os períodos de cura, o sistema solo-cal apresenta um comportamento menos compressível e mecanicamente mais resistente.

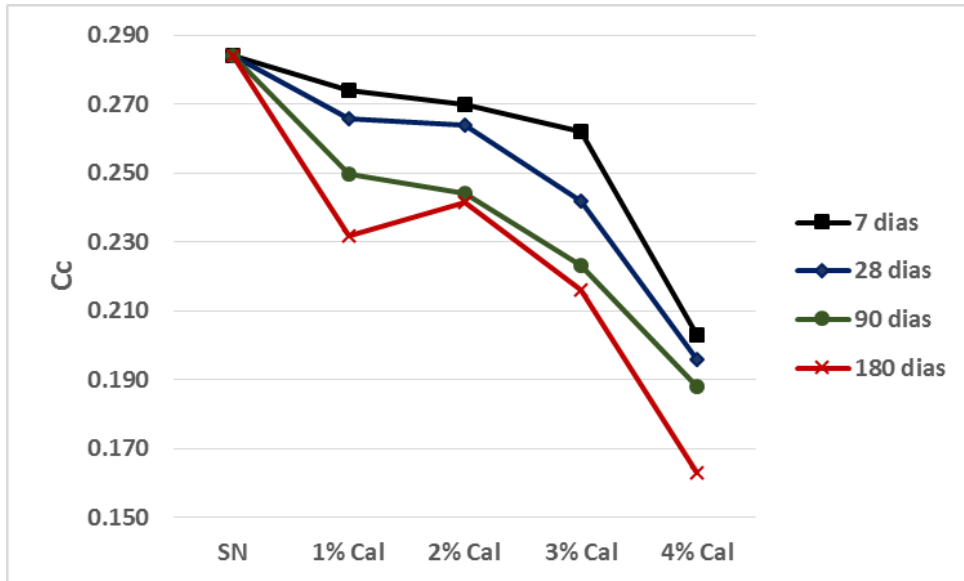


Figura 28. Índice de compressão do solo e das misturas solo-cal.

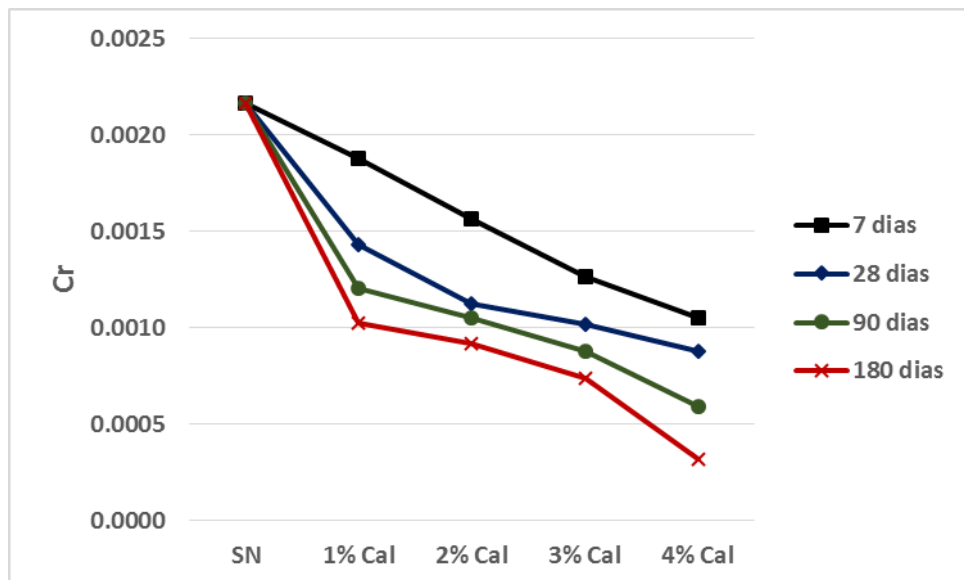


Figura 29. Índice de recompressão do solo e das misturas solo-cal.

5 CONCLUSÕES

Na presente pesquisa, foram realizadas análises geotécnicas das propriedades de engenharia das misturas solo-cal compactadas. Com base nos resultados obtidos nos ensaios de compactação dinâmica, compressão não confinada, permeabilidade e adensamento CRD, concluiu-se que:

- com o incremento do teor de cal, observaram-se mudanças nos pares de parâmetros ótimos no ensaio de compactação, como o aumento no teor de umidade ótimo e a redução no peso específico aparente seco máximo, devido à ocorrência das reações de troca catiônica com conseqüente aglomeração-floculação das partículas finas;
- todas as misturas solo-cal avaliadas resultaram em aumentos na resistência à compressão não confinada, sendo que estes foram proporcionais aos teores de cal avaliados e aos períodos e temperaturas de cura adotados tanto nos tratamentos com cura tradicional quanto naqueles com cura acelerada;
- nas curvas tensão-deformação dos ensaios de compressão não confinada, foram verificadas maiores deformações para elevados valores de tensão, o que corroborou com a teoria de que a evolução do parâmetro de deformabilidade depende, essencialmente, do teor de cal, do tempo e da temperatura de cura;
- este estudo reforça a teoria de que as reações desenvolvidas entre a cal e a argila ao longo do tempo reduzem a permeabilidade nas misturas solo-cal, quer modificando o tamanho dos poros através do seu preenchimento e cimentação quer diminuindo a acessibilidade da água a esses poros;
- o ensaio de adensamento CRD proporcionou o conhecimento dos parâmetros de compressibilidade do solo e das misturas solo-cal de maneira mais rápida e eficiente, explicitando que com o incremento dos teores de cal e períodos de cura, as amostras se apresentaram mais rígidas e portanto, menos compressíveis; e
- vale ressaltar a rapidez e importância do ensaio de adensamento CRD para as misturas cimentadas, o qual permitiu que os períodos de cura ensaiados não fossem afetados de modo significativo.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Comumente, associa-se o desenvolvimento de reações pozolânicas em misturas solo-cal (solos reativos à cal) ao período de cura, com discrepância apreciável entre os resultados obtidos por pesquisadores até o presente momento. Há pesquisadores que associam o desenvolvimento de produtos de reações pozolânicas com ganhos significativos de resistência mecânica a períodos de cura da ordem de poucos dias, outros se referem ao período mínimo de 7 dias para que isto ocorra, sendo que, em geral, autores destacam que estas reações requerem períodos de cura de médio a longo prazo. Na presente pesquisa, observou-se que a adição de cal a um Latossolo Vermelho Amarelo produziu ganhos significativos de resistência mecânica já a partir de 3 dias de cura das misturas. Assim, considerando-se o conjunto de solos reativos à cal da Zona da Mata de Minas Gerais (Latosolos e Argissolos), recomenda-se analisar:

- a influência do período de cura no ganho de resistência mecânica das misturas devido ao desenvolvimento de reações pozolânicas, englobando tempos da ordem do dia ao ano;
- a ocorrência de mudanças físico-químicas nos minerais dos solos em estudo, para os períodos de cura de 1 dia ao ano, na busca de se avançar o estado de conhecimento sobre os mecanismos das reações solo-cal de solos tropicais, incorporando, também, o efeito da temperatura de cura no estudo. Neste caso, recomenda-se empregar a técnica de difração de raios-X (XRD), para se investigar a formação de novas fases cristalinas, e as técnicas de microscopia eletrônica de transmissão (TEM), microscopia eletrônica de varredura (SEM) e microanálise de raios-X dispersiva de energia (EDS ou EDXMA), para se detectar mudanças de composição e microestrutura durante os períodos de cura das misturas; e
- o efeito da temperatura de cura no desenvolvimento de reações pozolânicas e, conseqüentemente, no ganho de resistência mecânica das misturas, considerando-se tempos da ordem do dia ao ano, de modo a desenvolver relações diretas de ganho de resistência mecânica entre a temperatura e o período de cura das misturas.

Com base no presente estudo, recomenda-se, também:

- cuidado especial com o controle da compactação, de modo a não se produzirem

alterações estruturais nos corpos de prova em estudo, como também o controle da umidade dos corpos de prova no processo de confecção e cura dos mesmos;

- determinar a razão entre tração e compressão nas misturas solo cal com cura acelerada; e
- realizar ensaios de adensamento CRD com mais repetições nas amostras de forma que se tenham estudos estatísticos que ratifiquem os resultados obtidos na presente pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, M. A. M.; LIMA, D. C.; BUENO, B. S. & COSTA, L. M. Estabilização de solos com cal em regiões tropicais: aplicação a solos de Ilha Solteira-SP, Brasil. **Anais do 6º Congresso Nacional de Geotecnia**, p. 211-220, 1997.

ALHASSAN, M. Permeability of lateritic soil treated with lime and rice husk ash. Assumption Univ., **J. Thailand**, 12 (2), p. 115-120, 2008.

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

AL-MUKHTAR, M.; LASLEDJ, A.; ALCOVER, J. F. Behaviour and mineralogy changes in lime treated expansive soil at 50 °C. **Applied Clay Science** 50, p. 199–203, 2010b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4186**. Standard test method for one-dimensional consolidation properties of saturated cohesive Soils Using Controlled Strain Loading. Philadelphia, 2012, 18p.

ANDRADE, M. E. S. **Contribuição ao Estudo das Argilas Moles da Cidade de Santos**. 2009. 413 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ARMOUR, D. W.; DRNEVICH, V. P. **Improved Techniques for the Constant Rate of Strain Consolidation Test**. Consolidation of Soils: Testing and Evaluation, ASTM STP 892. R.N. Yong and Townsend. American Society of Testing and Materials. Philadelphia, p.170-183, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de Solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a, 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016b, 5p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016c, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016d, 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016e, 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770**: Solo coesivo – determinação da resistência à compressão não confinada. Rio de Janeiro, 1992, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**: Solo - determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1995 b, 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**: Solo – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000, 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE CAL. São Paulo, 2008. Disponível em <<http://www.abcp.org.br/>> Acesso em: 15 de julho de 2016.

BARBOSA, P. S. A.; LEROUEIL, S. Strength and compressibility of a reconstituted and slightly cemented saprolitic soil. In: **Anais**. International Conference on Unsaturated Soils, 2, August 27-30, Pequim. Proceedings. Pequim: ISSMFE, p. 7-12, 1998.

BASHEER, I. A. Empirical modeling of the compaction curve of cohesive soils. **Canadian Geotechnical Journal**. v. 38, p. 29-45, 2001.

BATISTA, C. F. N. Pesquisa solo-cal. In: Reunião Anual de Pavimentação, 10. 1969. Salvador, BA. **Anais...**, Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Pavimentação (ABP), p. 114-142, 1969.

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

BENETTI, M. **Comportamento hidráulico e mecânico de um solo residual tratado com cal**. 2015. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

BISWAS, B. R. **Study of accelerated curing and other factors influencing soil stabilization**. 1972. Dissertation submitted to the Graduate College of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirement of the degree of Doctor of Philosophy, Texas, 1972.

BOARDMAN, D. I.; GLENDINNING, S.; ROGERS, C. D .F. Development of stabilisation and solidification in lime–clay mixes. **Geotechnique** 50, p. 533–543, 2001.

CANESCHI, F. P. **Estudos geoambientais em solos modificados quimicamente**. 2012. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

CARVALHO, S. L.; ALMEIDA, M. S. & MARTINS, I. S. M. Ensaio de adensamento com velocidade controlada: proposta de um método para definição da velocidade. **Solos e Rochas**, São Paulo, 16 (3), p. 185-196, 1993.

CASAGRANDE, A. The determination of preconsolidation load and its practical significance. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. **Cambridge. Proceedings...** Cambridge: Harvard University, Graduate School of Engineering, v.3, p. 60-64, 1936.

COSTA, W. G. S. **Efeito da variação do gradiente hidráulico na estrutura de um solo compactado**. 2016. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal.** 2001. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Minho, Guimarães, 2001.

CRISTELO, N. & JALALI, S. Avaliação do melhoramento e estabilização de solos graníticos com cal e um ativador químico. **Anais do 8º Congresso Nacional de Geotecnia**, Portugal, p. 1515-1524, 2002.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos Parâmetros-Chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal.** 2009. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DE BRITO GALVÃO, T. C.; ELSHARIEF. A.; SIMÕES, G. F. Effects of lime on permeability and compressibility of two tropical residual soils. **J. Environ. Eng.**, 130 (8), p. 881-885, 2004.

DIAMOND, S.; KINTER, E. B. Mechanisms of soil lime stabilization: an interpretive review. **Highway Research Record**, Washington, n. 92, 1965.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 129/94:** Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994, 7p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 143/10:** Pavimentação – Base de solo-cimento - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010, 10p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de pavimentação.** Rio de Janeiro. Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, IPR - Publicação 719, p. 274, 2006.

DRAKE, J. A.; MOORE, D.; HALIBURTON, T. A. Accelerated curing of salt-treated and lime-treated cohesive soils. **Highway Research Record**, n. 381, p. 10-19, 1972.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Brasília, p. 412, 1999.

- EADES, J. L.; GRIM, R. E. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. **Highway Research Record**, n. 139, Washington, D C, 1966.
- EL-RAWI, N. M.; AWAD, A. A. A. Permeability of lime stabilized soils. **T. Eng. J.**, 107 (1), p. 25-35, 1981.
- GORMAN, C. T.; HOPKINS, T. C.; DRNEVICH, V. P. Constant Rate of Strain and Controlled Gradient Testing. **Geotechnical Testing Journal, ASTM**. Vol.1, n.1,p3-15, 1978.
- GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 2ª Edição, Pini, São Paulo, 2002.
- HARTY, J. R.; THOMPSON, M. R. Lime reativity of tropical and subtropical soil. **Highway Research Record**, Washington, n. 442, p.102-112, 1973.
- HERRIN, M.; MITCHELL, H. **Misturas solo-cal**. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Tradução n. 1, p. 74, 1967.
- INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization: principles and practice**. Sidney: Butterworths, p. 374, 1972.
- KASSIN, A. K.; CLARKE, B. G Constant Rate of Strain Consolidation Equipment and Procedure for Stabilized Soils. **Geotechnical Testing Journal**, vol. 22, p. 13-21, 1999.
- KER, J. C. **Latossolos do Brasil: uma revisão**. Belo Horizonte: Geonomos 5, p. 17-40, 1997.
- KHATTAB, S. A. A.; AL-MUKHTAR, M.; FLEUREAU, J.M. Long-term stability characteristics of a lime-treated plastic soil. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 4, p. 358-366, 2007.
- LIMA, D. C. **Algumas considerações relativas à estabilização dos solos, em particular à estabilização solo-cal**. 1981. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1981.
- LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. Estabilização dos solos III: mistura solo-cal para fins rodoviários. Publicação n. 334, Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, **Imprensa Universitária**, p. 40, 1993.

LIMA, D. C.; MACHADO, C. C.; CARVALHO, C. A. B.; SILVA, C. H. C.; PEREIRA, R. S.; TRINDADE, T. P.; BARBOSA, P. S. A experiência da UFV no emprego de estabilizantes químicos em estradas florestais. In: **Anais**. 6º Simpósio Brasileiro sobre colheita e transporte florestal, Belo Horizonte, MG. Proceedings, Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais (SIF), p. 69-117, 2003.

LIMA, P. F. **Ensaio oedométrico com taxa de deslocamento constante em solos muito moles**. 1996. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

LITTLE, D. N. **Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime**. Published by Kendall/Hunt Publishing Company, 1995.

LOPES JUNIOR, L. S. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada**. 2007. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LOPES JUNIOR, L. S. **Metodologia de previsão do comportamento mecânico de solos tratados com cal**. 2011. 226 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

LU, L. W.; DAVIDSON, D. T.; HANDY, R. L.; LAGUROS, J. G. The calcium: magnesium ratio in soil lime stabilization. **Highway Research Record**, Washington, Bulletin n. 36, p. 16-29, 1961.

MALLELA, J.; HAROLD VON QUINTUS, P.; SMITH, K. L. Consideration of lime stabilized layers in mechanistic-empirical pavement designs. **The National Lime Association**, Arlington, Virgínia, USA, 2004.

MENDONÇA, A. A.; SANTOS, M. F.; LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; FONTES, M. P. F. Resistência mecânica de misturas solo-cal: estudo de caso com dois solos de Viçosa-MG. In: **Anais**. 30a RAPv, Salvador, 24 a 29 de novembro, 1996.

MENDONÇA, A. A. **Caracterização tecnológica de misturas solo-cal**. 1998. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

MILBURN, J. P.; PARSONS, R. **Performance of soil stabilization agents**. Report KU-01-8, Kansas Department of Transportation, Topeka, KS, 2004.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley, p. 592, 2005.

MOURA, A. P. **Adensamento com velocidade controlada de deformação (CRS): desenvolvimento do equipamento e realização de ensaios em solos moles do leste de Santa Catarina**. 2004. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

NALBANTOGLU, Z.; TUNCER, E.R. Compressibility and hydraulic conductivity of chemically treated expansive clay. **Can. Geotech. J.**, 38 (1), p.154-160, 2001.

NÓBREGA, M. T. V. **O uso da cal na engenharia civil**. Reunião Aberta da Indústria da Cal. São Paulo, Escola Politécnica da USP, p. 174, 1985.

NOGAMI, J. S. **Solos tropicais em pavimentação**. Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv), Comissão de Solos Tropicais, 1966.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Vilibor, 1995.

PINTO, C. S. **Estudo da avaliação da capacidade de suporte de um solo pela adição de pequena quantidade de cal ou de cimento**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. São Paulo, p. 41, 1964.

PINTO, C. S. **Estudo de solo-cal com solos brasileiros**. Publicação n. 64, Rio de Janeiro. Instituto de Pesquisas Rodoviária (IPR), p. 17, 1965.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3ª ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RAJASEKARAN, G.; RAO, S. N. Compressibility behaviour of lime-treated marine clay. **Ocean Eng.**, 29 (5), p. 545-559, 2002.

RAO, S. M.; SHIVANANDA, P. Compressibility behaviour of lime-stabilized clay. **Geotech. Geolog. Eng.**, 23 (3), p. 309-319, 2005.

RIBEIRO, L. F. M. **Ensaio de laboratório para a determinação das características geotécnicas da argila mole de Sergipe**. 1992. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 1992.

ROQUE, L. A. **Áreas de risco geológico-geotécnico associadas a movimentos de massas no núcleo urbano de Viçosa – MG**. 2013. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

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

SANTOS, J. **Estabilização de uma argila laterítica do Distrito Federal para uso em rodovias de baixo volume de tráfego**. 2004. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

SCHNAID, F.; PRIETTO, P. D. M.; CONSOLI, N. C. Prediction of Cemented Sand Behavior in Triaxial Compression. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York: ASCE, v.127, n.10, p. 857-868, 2001.

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

SILVANI, C. **Influência da temperatura de cura no comportamento mecânico de misturas areia-cinza volante-cal**. 2013. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SILVANI, C. **Solos artificialmente cimentados em célula cúbica: isotropia a pequenas deformações e na ruptura**. 2017. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SINGH, J.; KUMAR, A.; JAIN, R.; KHULLAR, N. Effect of lime on properties of soil. **Anais**. Proceedings 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG). Anjuran Goa, Índia, 2008.

SMITH, R. E. & WHALS, H. E. Consolidation under constant rates of strains. **Journal Soil Mech. and Found.** Division, ASCE, vol. 95, p. 519-539, 1969.

SMITH, J.H. Construction of lime or lime plus cement stabilized cohesive soil. In: Roger, C.D.F., Glendinning, S., Dixon, N. (Eds.), **Lime Stabilization**. Thomas Telford, London, p. 13–26, 1996.

SPANNEMBERG, M. G. **Caracterização Geotécnica de um Depósito de Argila Mole da Baixada Fluminense**. 2003. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2003.

THOMPSON, M. R. Shear strength and elastic properties of limesoil mixtures. **Highway Research Record**, Washington, 11.139, p. 1-14, 1966.

THOMPSON, M. R. **Design coefficients for lime-soil mixtures**. Illinois Division of Highways Research and Development, Report, n. 22, 1970.

THOMPSON, M. R. Split-Tensile Strength of Lime-Stabilized Soils. **Highway Research Record**, Washington, D.C., v. 92, p. 69-82, 1975.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Lime stabilization, reactions, properties, design and construction**. Washington: TRB, p. 58, 1987.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, p.509, 1977.

VELTEN, Z. R. **Condutividade eletrosmótica e remediação de solos contaminados com cádmio via eletrosmose**. 2008. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

VITOR, K. A. **Verificação do desempenho do ensaio de adensamento CRS comparado ao SIC**. 2012. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

WINTERKORN, H. F.; PAMUKCU, S. Soil stabilization and grouting. In: **Anais**. Fang, Hsai-Yang (Ed.), **Foundation Engineering Handbook**. Van Nostrand Reinhold, New York, p. 317–378, 1991.

WISSA, A. E. Z.; CHRISTIAN, J. T.; DAVIS, E. H.; HEIBERG, S. Consolidation at constant rate of strain. **Journal Soil Mechanical and Foundations Division**, ASCE, 97, p. 1393-1413, 1971.

ANEXO A

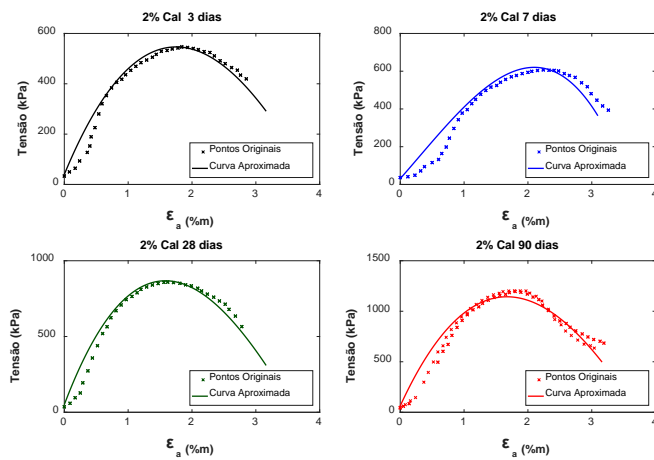


Figura 30. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura tradicional no teor de 2% de cal.

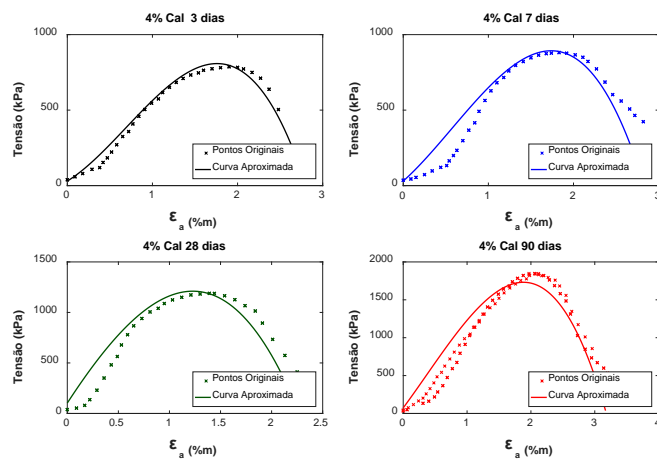


Figura 31. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura tradicional no teor de 4% de cal.

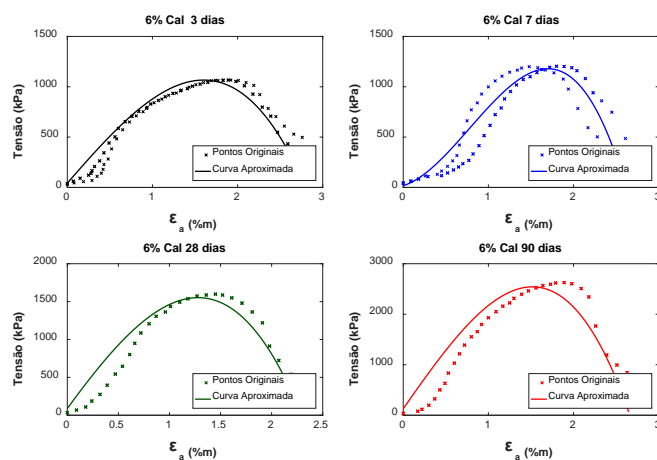


Figura 32. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura tradicional no teor de 6% de cal.

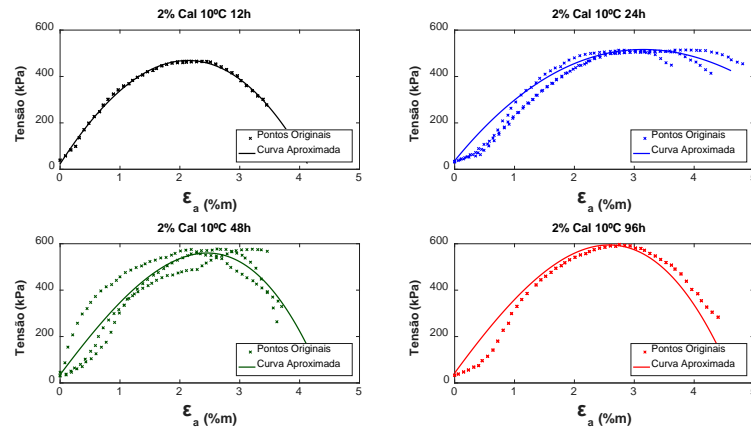


Figura 33. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 2% de cal e na temperatura de cura de 10 °C.

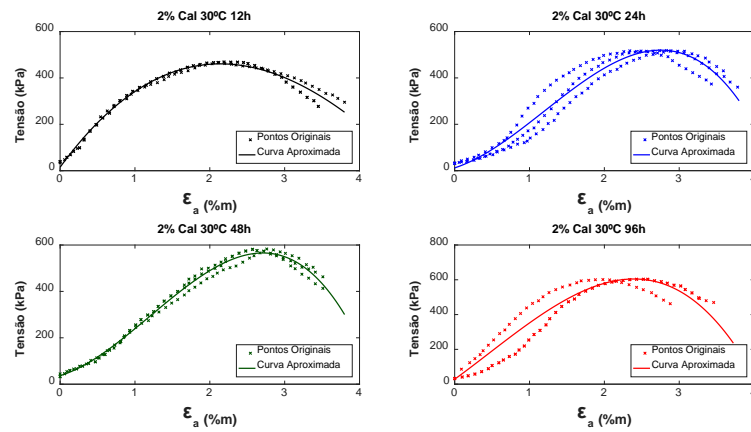


Figura 34. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 2% de cal e na temperatura de cura de 30 °C.

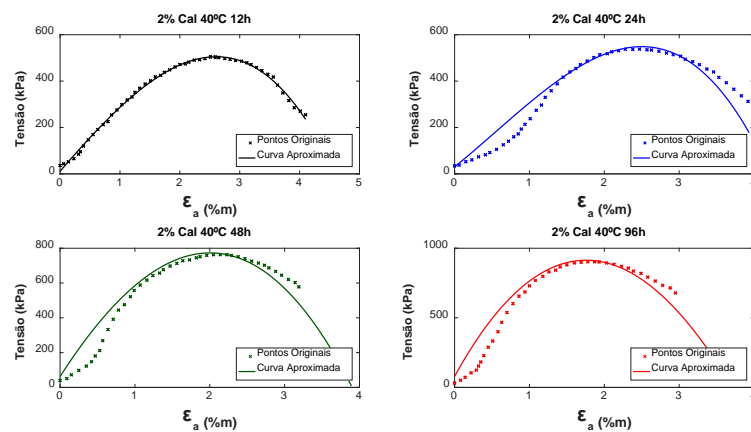


Figura 35. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 2% de cal e na temperatura de cura de 40 °C.

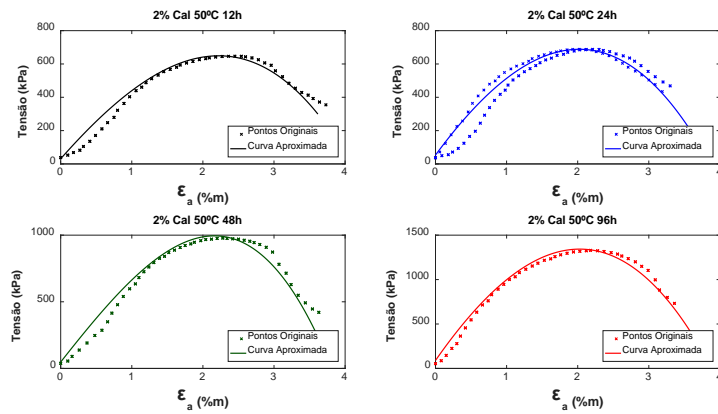


Figura 36. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 2% de cal e na temperatura de cura de 50 °C.

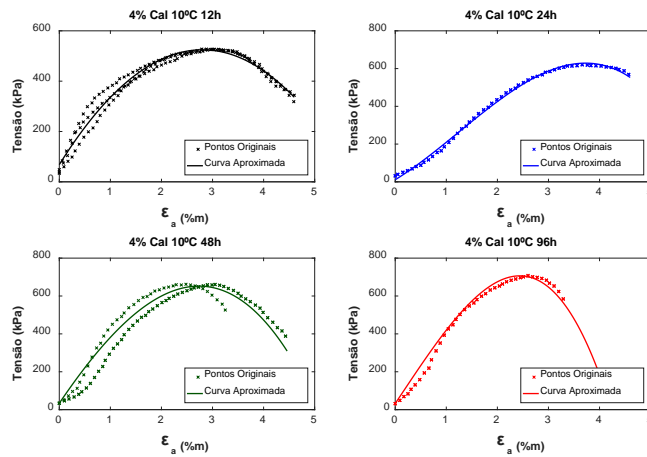


Figura 37. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 4% de cal e na temperatura de cura de 10 °C.

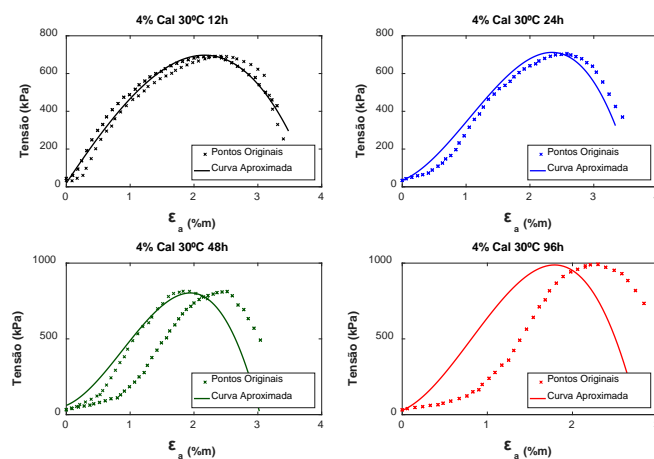


Figura 38. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 4% de cal e na temperatura de cura de 30 °C.

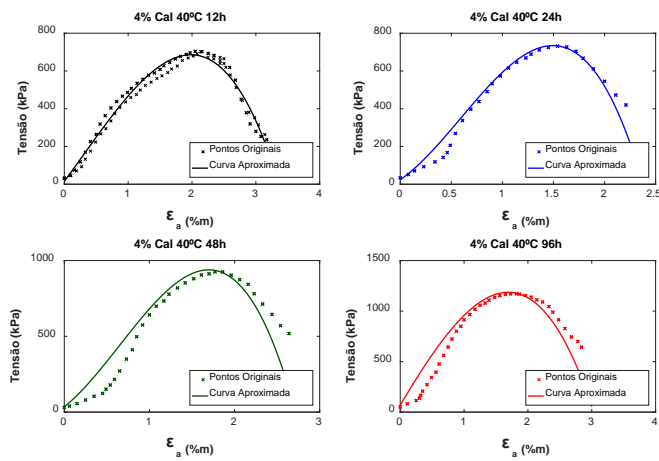


Figura 39. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 4% de cal e na temperatura de cura de 40 °C.

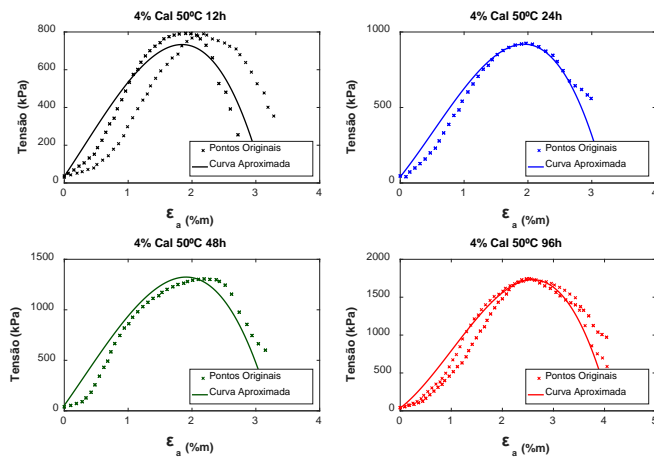


Figura 40. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 4% de cal e na temperatura de cura de 50 °C.

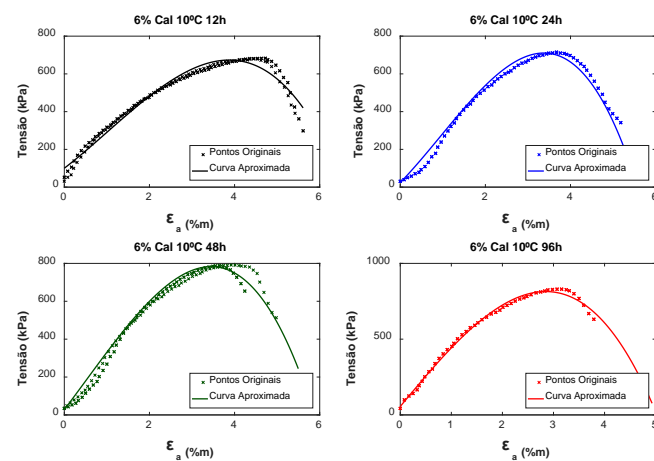


Figura 41. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 6% de cal e na temperatura de cura de 10 °C.

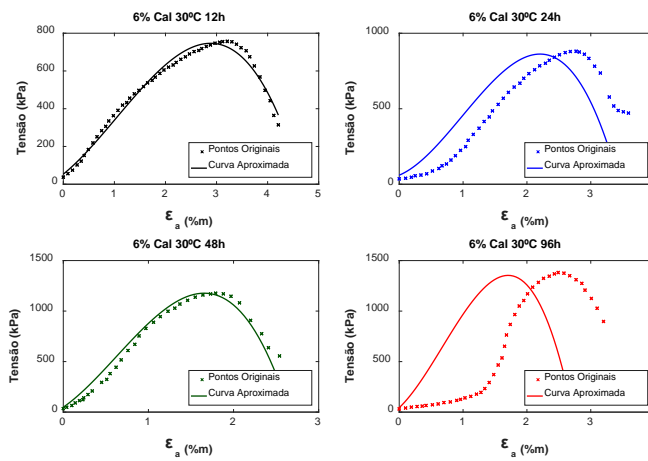


Figura 42. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 6% de cal e na temperatura de cura de 30 °C.

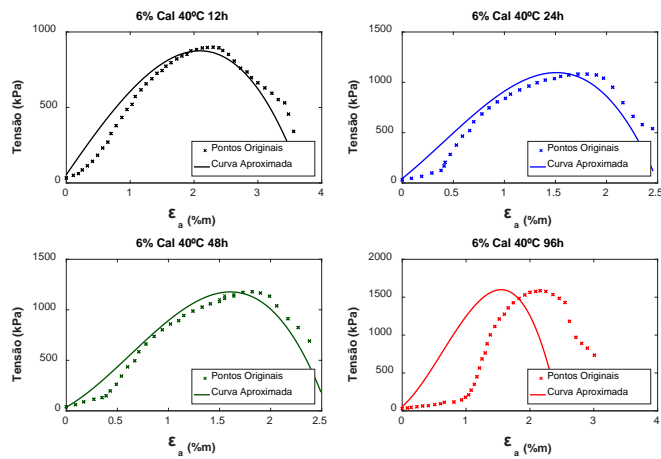


Figura 43. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 6% de cal e na temperatura de cura de 40 °C.

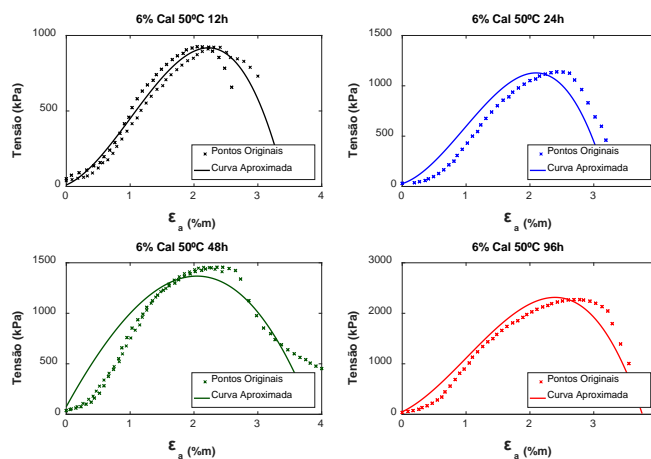


Figura 44. Curvas tensão-deformação para os ensaios com cura acelerada no teor de 6% de cal e na temperatura de cura de 50 °C.