

FERNANDO PAULO CANESCHI

**MUDANÇAS COMPOSICIONAIS QUÍMICAS E MINERALÓGICAS DE UM  
LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO VISANDO A PRODUÇÃO DE SOLOS  
MODIFICADOS**

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  
2008

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

C221m  
2008

Caneschi, Fernando Paulo, 1982-  
Mudanças composicionais químicas e mineralógicas  
de um latossolo vermelho-amarelo visando a produção  
de solos modificados / Fernando Paulo Caneschi. – Viçosa,  
MG, 2008.  
xiv, 83f.: il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Dario Cardoso de Lima.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f. 79-83.

1. Mecânica do solo. 2. Mineralogia. 3. Latossolos.  
4. Solo - Testes. 5. Química do solo. I. Universidade Federal  
de Viçosa. II. Título.

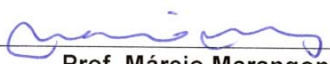
CDD 22.ed. 624.15136

FERNANDO PAULO CANESCHI

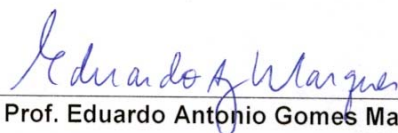
**MUDANÇAS COMPOSICIONAIS QUÍMICAS E MINERALÓGICAS DE UM  
LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO VISANDO A PRODUÇÃO DE  
SOLOS MODIFICADOS**

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*.

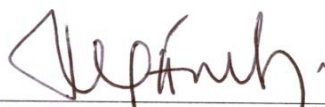
**APROVADA: 26 de fevereiro de 2008.**



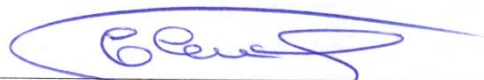
Prof. Márcio Marangon



Prof. Eduardo Antonio Gomes Marques



Prof. Mauricio Paulo Ferreira Fontes  
(Co-Orientador)



D.S. Tiago Pinto da Trindade  
(Co-Orientador)



Prof. Dario Cardoso de Lima  
(Orientador)

Dedico este trabalho aos  
meus pais Sebastião e Maria  
Luiza.

## **Agradecimentos**

À Deus, por me iluminar durante toda essa caminhada.

Aos meus pais, Sebastião e Maria Luiza, pela oportunidade de crescer, pela ajuda nos momentos difíceis da vida e também pelos conselhos e incentivos.

Ao meu irmão César, pelas palavras amigas e sinceras.

À minha noiva Nívea, pela partilha de todos os acontecimentos durante esse período.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela oportunidade de realização dos cursos de Graduação e de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Aos Departamentos de Engenharia Civil (DEC) e de Solos (DPS), por disponibilizar toda infra-estrutura necessária para o desenvolvimento deste estudo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro através do Processo TEC 1982/05 e pela concessão de bolsa de iniciação científica, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelas concessões de bolsas de mestrado.

Ao professor Dario Cardoso de Lima, pela amizade, incentivos, ensinamentos, pela paciência durante a realização deste trabalho e pela ajuda de todas as formas.

Ao professor Maurício Paulo Ferreira Fontes e ao Doutor Tiago Pinto da Trindade, pelas sugestões e críticas que sem dúvida contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Paulo Sergio de Almeida Barbosa, pela ajuda, atenção e dedicação, em especial na realização dos experimentos conduzidos no Laboratório de Engenharia Civil da UFV.

Aos amigos Adonai Fineza, Fernando Portelinha, Danilo Resende, Flávio Crispim, Gersonito Vieira, Giovanni Sant'Anna, Gisele Custódio,

Rodrigo Zorzal, Rogério Dalla Riva, pela excelente convivência dentro e fora do laboratório.

À Madalena Ribeiro, pela ajuda na execução de ensaios de laboratório para esse trabalho.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Civil da UFV José Mario Duarte, Júlio Carlos dos Santos, Paulo Afonso da Silva, Jorge Luis Araújo, bem como aos técnicos do Departamento de Solos da UFV Carlos Antônio da Fonseca, José Francisco Dias, pela grande colaboração na execução dos ensaios necessários para a realização desta pesquisa.

E de forma abrangente, a todos que de uma maneira direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

## **Biografia**

FERNANDO PAULO CANESCHI, filho de Sebastião de Paulo Caneschi e Maria Luiza Caneschi, é natural de Ubá, Minas Gerais.

Em abril de 2001, ingressou no Curso de Engenharia Civil na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa Minas Gerais. Foi bolsista de Iniciação Científica no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa no período de 2003-2005. Em maio de 2006, graduou-se Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Viçosa.

Em maio de 2006, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, Área de Concentração em Geotecnia, ao nível de mestrado, submetendo-se à defesa de dissertação em fevereiro de 2008.

# Sumario

<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>viii</b>
<b>Índice de Tabelas .....</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de símbolos e abreviaturas .....</b>	<b>xii</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>xiii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>xiv</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Generalidades .....	1
1.2. Objetivos do trabalho.....	2
1.3. Organização do trabalho .....	3
<b>2. Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>4</b>
2.1. Elementos de interesse no estudo dos solos .....	4
2.1.1. Visão geotécnica .....	4
2.1.2. Visão pedológica .....	5
2.1.3. Visão mineralógica .....	8
2.1.3.1. Caulinita .....	10
2.1.3.2. Goethita e hematita.....	11
2.1.3.3. Gibbsita.....	12
2.1.3.4. Quartzo .....	12
2.2. Solos da Microrregião de Viçosa com direcionamento ao LVA.....	12
2.2.1. Latossolos Vermelho-Amarelo (LVA).....	12
2.2.2. Solos da microrregião de Viçosa .....	16
2.3. Dupla camada difusa .....	19
2.4. Solos modificados.....	22
2.4.1. Processos de troca iônica.....	22
2.4.2. Processos de mudança composicional .....	26
<b>3. Materiais e Métodos .....</b>	<b>27</b>
3.1. Materiais .....	27
3.1.1. Solo.....	27
3.1.2. Ditionito de sódio .....	28
3.1.3. Sais: NaCl e CaCl <sub>2</sub> .....	28

3.2. Metodologia .....	29
3.2.1. Coleta e preparação da amostra do LVA .....	31
3.2.2. Preparação dos solos modificados .....	31
3.2.2.1. Determinação do teor de ditionito de sódio .....	31
3.2.2.2. Determinação dos teores dos sais.....	34
3.2.3. Análises químicas e eletroquímicas .....	35
3.2.4. Caracterização mineralógica .....	36
3.2.5. Caracterização geotécnica .....	38
3.2.5.1. Ensaio de caracterização.....	38
3.2.5.2. Ensaio de compactação.....	38
3.2.5.3. Ensaio de compressão não-confinada.....	39
3.2.5.4. Ensaio de condutividade hidráulica.....	40
3.2.5.5. Ensaio de compressão edométrica.....	40
3.2.5.6. Ensaio triaxiais consolidados isotropicamente drenados.....	40
<b>4. Resultados .....</b>	<b>42</b>
4.1. Preparação dos solos modificados.....	42
4.1.1. Determinação do teor de ditionito de sódio .....	42
4.1.2. Determinação do teor de sal para cada tratamento.....	47
4.2. Caracterização química .....	49
4.3. Caracterização geotécnica .....	51
4.3.1. Ensaio de caracterização.....	51
4.3.2. Ensaio de compactação.....	53
4.3.3. Ensaio de compressão não confinada.....	56
4.3.4. Ensaio de condutividade hidráulica .....	57
4.3.5. Ensaio de compressão edométrica .....	58
4.3.6. Ensaio triaxiais.....	67
<b>5. Conclusões .....</b>	<b>76</b>
<b>6. Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>78</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>79</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Distribuição das áreas de ocorrência de latossolos no Brasil (CAMARGO et al., 1986; apud KER, 1997). .....	14
<b>Figura 2.</b> Distribuição de LVA no Brasil (KER 1997). .....	14
<b>Figura 3.</b> Curva tensão versus índice de vazios do LVA, amostra indeformada (AZEVEDO, 1999). .....	19
<b>Figura 4.</b> Curva tensão versus índice de vazios do LVA, amostra compactada (AZEVEDO, 1999). .....	19
<b>Figura 5.</b> Local de coleta da amostra do solo residual maduro, pedologicamente classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA). .....	28
<b>Figura 6.</b> Detalhamento: preparação da amostra do LVA, modificação do solo e programa de ensaios de laboratório. ....	30
<b>Figura 7.</b> Difrátogramas de raios-X da fração silte mais argila do LVA e do LVA tratado com diferentes teores de ditonito de sódio, na umidade ótima: (a) sem tratamento; (b) tratamento com 3%; (c) tratamento com 6%; (d) tratamento com 9%; (e) tratamento com 12%; e (f) tratamento com 15%. 43	43
<b>Figura 8.</b> Difrátogramas de raios-X da fração silte mais argila do LVA e do LVA tratado com diferentes teores de ditonito de sódio, na umidade ótima mais 3%: (a) sem tratamento; (b) tratamento com 3%; (c) tratamento com 6%; (d) tratamento com 9%; (e) tratamento com 12%; e (f) tratamento com 15%. .....	43
<b>Figura 9.</b> Difrátogramas de raios-X da fração silte mais argila do LVA e do LVA tratado com diferentes teores de ditonito de sódio, na umidade ótima mais 6%: (a) sem tratamento; (b) tratamento com 3%; (c) tratamento com 6%; (d) tratamento com 9%; (e) tratamento com 12%; e (f) tratamento com 15%. .....	44
<b>Figura 10.</b> Modificações visuais produzidas na coloração do LVA, após a adição de ditonito de sódio, nos teores de 3%, 6%, 9%, 12% e 15%. .....	45
<b>Figura 11.</b> Resultados dos ensaios de limites de Atteberg (LL e LP) e do índice de plasticidade (IP) do LVA, para os teores de: (a) 6%, (b) 9% e (c) 12% de ditonito de sódio, para os tempos entre mistura e realização dos ensaios de 4 h, 8 h, 24 h, 48 h, 72 h e 96 h. ....	46

<b>Figura 12.</b> Quadro resumo dos resultados dos ensaios de limites de Atteberg (LL e LP) e do índice de plasticidade (IP) do LVA, para os teores de ditionito de sódio de 6%, 9% e 12%, para o tempo entre mistura e realização dos ensaios de 48 h. ....	47
<b>Figura 13.</b> Índices de saturação dos sais NaCl e CaCl <sub>2</sub> para as amostras de ST nos teores crescentes de 0,5%, 1%, 2%, 4% e 8% em relação a massa de solo seco. ....	48
<b>Figura 14.</b> Quantitativo de óxido de ferro (goethita) nas formas cristalinas e amorfas presente na fração argila do ST e TDS. ....	50
<b>Figura 15.</b> Difratogramas de raios-X da fração argila dos solos TDS (a) e ST (b). ....	51
<b>Figura 16.</b> Parâmetros de plasticidade, LL, LP e IP do solo e do solo após os tratamentos. ....	52
<b>Figura 17.</b> Curvas granulométricas dos seguintes solos: ST, TDS, TCa, TNa e TDS/Na. ....	53
<b>Figura 18.</b> Curvas de compactação do LVA, LVA-TDS, LVA-TCa, LVA-TNa, LVA-TDS-Ca (6% de ditionito de sódio) e LVA-TDS-Na (6% de ditionito de sódio). ....	54
<b>Figura 19.</b> Resultado dos ensaios de compressão não confinada do LVA e deste após os tratamentos. ....	56
<b>Figura 20.</b> Curvas de ruptura do solo ST com cada um dos tratamentos: (a) TDS, (b) TCa, (c) TNa, (d) TDS/Ca e (e) TDS/Na; e de todas as curvas juntas (f). ....	57
<b>Figura 21.</b> Curvas de compressão edométrica (a) e coeficiente de adensamento (b) de corpos-de-prova do ST compactados no $W_{ót}$ e $W_{ót} \pm 2\%$ . ....	59
<b>Figura 22.</b> Curvas de compressão edométrica (a) e coeficiente de adensamento (b) de corpos-de-prova do TDS compactados no $W_{ót}$ e $W_{ót} \pm 2\%$ . ....	60
<b>Figura 22.</b> Curvas de compressão edométrica (a) e coeficiente de adensamento (b) de corpos-de-prova do TDS compactados no $W_{ót}$ e $W_{ót} \pm 2\%$ . ....	62
<b>Figura 23.</b> Curvas de compressão edométrica (a) e coeficiente de adensamento (b) de corpos-de-prova do TCa compactados no $W_{ót}$ e $W_{ót} \pm 2\%$ . ....	63
<b>Figura 24.</b> Curvas de compressão edométrica (a) e coeficiente de adensamento (b) de corpos-de-prova do TNa compactados no $W_{ót}$ e $W_{ót} \pm 2\%$ . ....	64

<b>Figura 25.</b> Curvas de compressão edométrica (a) e coeficiente de adensamento (b) de corpos-de-prova do TDS/Ca compactados no $W_{ót}$ e $W_{ót} \pm 2\%$ . .....	65
<b>Figura 26.</b> Curvas de compressão edométrica (a) e coeficiente de adensamento (b) de corpos-de-prova do TDS/Na compactados no $W_{ót}$ e $W_{ót} \pm 2\%$ . .....	66
<b>Figura 27.</b> Curvas tensão versus deformação e módulos secantes de deformação obtidos em ensaios triaxiais CID realizados no solo ST.....	68
<b>Figura 28.</b> Curvas tensão versus deformação e módulos secantes de deformação obtidos em ensaios triaxiais CID realizados no solo TDS. ....	69
<b>Figura 29.</b> Curvas tensão versus deformação e módulos secantes de deformação obtidos em ensaios triaxiais CID realizados no solo TCa. ....	70
<b>Figura 30.</b> Curvas tensão versus deformação e módulos secantes de deformação obtidos em ensaios triaxiais CID realizados no solo TNa. ....	71
<b>Figura 31.</b> Curvas tensão versus deformação e módulos secantes de deformação obtidos em ensaios triaxiais CID realizados no solo TDS/Ca. ....	72
<b>Figura 32.</b> Curvas tensão versus deformação e módulos secantes de deformação obtidos em ensaios triaxiais CID realizados no solo TDS/Na. ....	73
<b>Figura 33.</b> Envoltórias de rupturas em termos de tensões efetivas dos solos: ST, TDS, TCa, TNa, TDS/Ca e TDS/Na. ....	74
<b>Figura 34.</b> Parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito em termos de tensões efetivas) para os referidos tratamentos. ....	75

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1.</b> Resultados de ensaios de caracterização de dois Latossolos Vermelho-Amarelo de Viçosa-MG (FERRAZ, 1994).....	18
<b>Tabela 2.</b> Índices físicos dos corpos-de-prova e resultados dos ensaios triaxiais consolidados não drenados realizados em um Latossolo Vermelho-Amarelo de Viçosa-MG, considerando amostras indeformadas e amostras compactadas na energia do ensaio Proctor normal (AZEVEDO, 1999) ....	18
<b>Tabela 3.</b> Especificações técnicas dos sais ( $\text{CaCl}_2$ e $\text{NaCl}$ ) utilizados no presente estudo.....	29
<b>Tabela 4.</b> Especificações da energia de compactação usada nos ensaios de compactação .....	39
<b>Tabela 5.</b> Propriedades químicas do LVA-ST e demais tratamentos .....	49
<b>Tabela 6.</b> Resumo dos dados de caracterização geotécnica .....	51
<b>Tabela 7.</b> Classificação USC e TRB para os solos modificados .....	53
<b>Tabela 8.</b> Resumo dos parâmetros ótimos de compactação dos tratamentos.....	54
<b>Tabela 9.</b> Resultado dos ensaios de condutividade hidráulica .....	58
<b>Tabela 10.</b> Tensão de pré-adensamento ( $\sigma_v$ ) determinadas em ensaios de compressão edométrica realizados nos corpos-de-prova moldados na $W_{\text{ót}}$ e $W_{\text{ót}} \pm 2\%$ .....	67
<b>Tabela 11.</b> Equações de regressão das envoltórias de ruptura para os tratamentos conferidos ao LVA .....	74

## Lista de símbolos e abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ct	Mineral caulinita;
CID	Consolidados isotropicamente drenados;
CTC	Capacidade de Troca Catiônica;
C'	Coesão efetiva;
$c_v$	Coeficiente de adensamento;
DEC	Departamento de Engenharia Civil;
DEF	Departamento de Engenharia Florestal;
DNIT	Departamento de Infraestrutura e Transporte;
e	Índice de vazios;
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;
Gb	Mineral gibsita;
Gt	Mineral goethita;
Qz	Mineral quartzo;
Hm	Mineral hematita;
IP	Índice de plasticidade;
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
LL	Limite de liquidez;
LP'	Limite de plasticidade;
LVA	Latossolo vermelho-amarelo;
K	Coeficiente de condutividade hidráulica;
LEC	Laboratório de Engenharia Civil;
MCT	Miniatura, Compactada e Tropical;
n	Porosidade;
SB	Saturação por bases;
Sr	Grau de saturação;
TRB	Transportation Research Board;
UFV	Universidade Federal de Viçosa;
USC	Unified Soil Classification;
$W_{ót}$	Teor de umidade ótimo;
$\phi'$	Ângulo de atrito efetivo;
$\gamma_{dmax}$	Peso específico aparente seco máximo;
$\gamma_d$	Peso específico seco;
$\gamma_s$	Peso específico dos grãos;
$\sigma_v$	Tensão de pré-adensamento;
$\sigma_1$	Tensão vertical de carregamento;
$\sigma_3$	Tensão de confinamento do corpo-de-prova;

## Resumo

CANESCHI, Fernando Paulo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2008. **Mudanças Composicionais Químicas e Mineralógicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo Visando a Produção de Solos Modificados**. Orientador: Dario Cardoso de Lima. Co-Orientadores: Carlos Cardoso Machado, Mauricio Paulo Ferreira Fontes e Tiago Pinto da Trindade.

Nesta pesquisa, buscou-se aplicar a um solo de ocorrência significativa na região Sudeste e em parte expressiva do território brasileiro uma técnica para a sua conversão em novos produtos, aqui denominados de “solos modificados”. Essa técnica teve por base a modificação das composições química e mineralógica do solo em estudo, com intuito de alterar os seus padrões de comportamento geotécnico. O programa de estudo de laboratório abrangeu: (i) caracterizações química, mineralógica e geotécnica do solo em estudo; (ii) desenvolvimento de processos capazes de promover alterações nas propriedades químicas e mineralógicas, com vistas à produção de “solos modificados”; (iii) caracterizações química e geotécnica dos “solos modificados”. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que: (i) os métodos desenvolvidos para a modificação do solo em estudo mostraram-se adequados para as finalidades previstas, bem como apresentaram a vantagem de poderem ser, com pequenas adaptações, implementados em trabalhos de campo; (ii) os tratamentos provocaram mudanças significativas nos parâmetros químicos, em especial na CTC do solo; (iii) os tratamentos conferiram ao solo analisado mudanças geotécnicas significativas nos seus parâmetros de plasticidade (redução do LL e LP) e de compactação (aumento do peso específico aparente seco máximo e queda no teor ótimo de umidade) e, em menor escala, nos de resistência à compressão não-confinada, condutividade hidráulica, compressibilidade e resistência ao cisalhamento determinada em ensaios triaxiais.

## Abstract

CANESCHI, Fernando Paulo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2008. **Chemical and mineralogical composition changes of a Latossol in order to produce modified soils for geotechnical applications.** Advisor: Dario Cardoso de Lima. Co-Advisors: Carlos Cardoso Machado, Mauricio Paulo Ferreira Fontes and Tiago Pinto da Trindade.

This research addresses the application of a technique to a soil from the Southeast of Brazil and representing significant portion of the Brazilian territory in order to produce new products herein named *modified soils*. This conversion was based on the manipulation of the soil chemical and mineralogical compositions in order to change its geotechnical behavior. The laboratory testing program encompassed the following steps: (i) chemical, mineralogical and geotechnical characterization of the soil; (ii) development of chemical and mineralogical procedures for soil modification; (iii) chemical and geotechnical characterizations of the modified soils. Based on the testing data, conclusions are as follow: (i) good performance of the developed procedures for soil modification, which can be applied to field conditions after minor adjustment; (ii) the applied treatments produced significant variation in the chemical soil parameters, specially in the CEC; (iii) the treatments were responsible for significant geotechnical changes in the soil plasticity and compaction parameters, and for minor changes in the soil unconfined compression strength, hydraulic conductivity, compressibility and shear strength determined through triaxial tests.

## 1. Introdução

---

### 1.1. Generalidades

A geotecnia abrange obras civis diversas, em sua maioria, de grande porte e que apresentam custos elevados, tais como barragens, aterros, estradas, fundações, escavações a céu aberto, túneis, contenções de encostas e sistemas de impermeabilização de bases de aterros sanitários, lagos de rejeito e lagoas de estabilização, dentre outras.

Tais obras chamadas de obras geotécnicas ou de terra, são aquelas onde, geralmente, se trabalha com grandes volumes de solo, um dos mais importantes materiais utilizados na construção civil. No entanto, na execução de projetos relacionados com solos, surgem problemas não encontrados em outros materiais utilizados na construção civil, o que se deve, sobretudo, à sua heterogeneidade.

A partir dessas constatações, surge o interesse em buscar o desenvolvimento de novas técnicas capazes de conferir aos solos, padrões de comportamento tecnológico adequados para determinadas aplicações geotécnicas.

Assim, vários pesquisadores têm-se empenhado em estudar materiais, em especial os solos, e desenvolver novas técnicas de se trabalhar com eles. Dentro dessa visão Mitchell, (1993) relata que se o tipo de mineral presente na fração argila de um solo é importante para a descrição do seu comportamento mecânico, pode-se afirmar que as características dos seus íons trocáveis, também, influenciam significativamente o seu comportamento de engenharia. Também, com essa visão, Fang (1997) apresenta o conceito do que, em uma tradução livre, podem ser denominados “solos fabricados pelo homem” (*man made soils*); aplicável a uma faixa restrita de solos, ou seja, os de textura argilosa, onde a idéia básica é controlar a substituição ou a manipulação dos seus íons, de modo a se atender a determinadas exigências técnicas de engenharia.

O presente trabalho, parte do princípio de que, na realidade, as mudanças introduzidas em um solo de textura argilosa, muitas vezes, não são radicais o suficiente para lhe provocarem mudanças genéticas. Assim, adota-se a denominação de “solos modificados”, bem como se introduz o aspecto de mudança composicional, partindo-se do princípio de que a composição mineralógica da fração argila de um solo pode ser modificada sob determinados tratamentos. Geotecnicamente, uma abordagem dessa natureza traz à tona indagações sobre a influência dessas mudanças no comportamento de engenharia dos solos.

Aplicações potenciais dos solos modificados englobam, dentre outros, o campo da geotecnia ambiental, com abordagem de problemas relacionados às técnicas de melhoramento de solos e ao armazenamento de produtos agressivos ao meio ambiente.

## **1.2. Objetivos do trabalho**

Nesta pesquisa buscou-se aplicar, a um solo típico de ocorrência significativa na microrregião de Viçosa, bem como na região Sudeste e em parte expressiva do território brasileiro, uma técnica para a sua conversão em novos produtos, aqui denominados de *solos modificados*. Essa conversão tem por base a manipulação das composições química e mineralógica desse solo, geotecnicamente classificado como residual maduro e pedologicamente como Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), de modo a alterar as suas características químico-mineralógicas e, conseqüentemente, os seus padrões de comportamentos físicos e mecânicos para finalidades geotécnicas, em especial geoambientais.

Nesse contexto, os objetivos do presente trabalho direcionaram-se para:

- estudos preliminares:
  - determinação das características físicas, químicas e mineralógicas do LVA;
  - desenvolvimento das técnicas de modificação do LVA, bem como determinação dos quantitativos de cada

agente modificador para a produção dos solos modificados.

- produção dos solos modificados:
  - a aplicação das técnicas desenvolvidas com os respectivos quantitativos, para a geração dos solos modificados.
- estudos geotécnicos comparativos:
  - realização de ensaios geotécnicos, no LVA e nos solos modificados, englobando, ensaios de caracterização geotécnica, compactação, compressão não-confinada, condutividade hidráulica, compressibilidade edométrica e triaxiais;
  - realização de ensaios mineralógicos (raios-X e determinação do quantitativo de óxidos de ferro) e químicos (ensaios de rotina);
  - análise comparativa dos resultados obtidos.

### **1.3. Organização do trabalho**

O presente trabalho está redigido em capítulos, sendo eles: (i) Introdução, com abordagem do tema em análise, objetivos e organização dos trabalhos; (ii) Revisão bibliográfica, onde se faz referência a estudos de interesse específico, visando apresentar conhecimentos geotécnicos, pedológicos, químicos e mineralógicos, bem como informações sobre solos da microrregião de Viçosa, com direcionamento ao LVA, e sobre solos modificados, englobando os processos de troca iônica e de mudança composicional; (iii) Materiais e métodos, em que se descrevem os materiais e as técnicas empregadas no presente estudo para a geração dos solos modificados e para realização dos ensaios de laboratório de interesse, (iv) Resultados e discussões, com exposição e análise dos dados obtidos; (v) Conclusões; e (vi) Sugestões para trabalhos futuros.

## **2. Revisão Bibliográfica**

---

### **2.1. Elementos de interesse no estudo dos solos**

#### **2.1.1. Visão geotécnica**

Dentro da visão geotécnica, prevalece a definição da Mecânica dos Solos, onde se consideram solos os materiais naturais da crosta terrestre cujos grãos constituintes podem ser separados pela ação suave da água (TERZAGHI e PECK, 1967), embora se possa questionar o significado do termo “suave”.

Com relação à formação originária dos solos, em Geotecnia é comum o uso de classificações genéticas que, se por um lado consideram que as feições genéticas de camadas superficiais se subordinam aos processos evolutivos, que lhes impõem particularidades mineralógicas e estruturais que as distanciam de suas origens sob os prismas físico, químico e de comportamento mecânico, por outro, trazem à tona o fato de que desfrutam de um campo de validade restrito a meios ambientes específicos, como destaca Vargas (1977), sendo, também, de natureza interpretativa. A título de exemplo, pode-se referir às classificações genéticas tradicionais propostas por Nogami (1971) e Vargas (1977).

Contudo, simplificando uma abordagem genética tradicional de solos e atendo-se a uma visão pragmática de engenharia pautada na busca da valorização da experiência acumulada com o projeto e construção de obras geotécnicas, Vaughan (1994) sugere dividir os solos em três grupos, como se segue: (i) transportados, como aqueles produtos que sofreram transporte pela água, vento, gelo ou via escorregamentos de encostas; nesses solos, as partículas foram formadas em outros ambientes que não os atuais de deposição, sendo que aspectos como a mineralogia e química superficial, dimensões e forma das partículas controlam as características de interesse geotécnico; (ii) residuais, como aqueles formados em suas posições naturais, pelo efeito dos processos de alteração agindo sobre rochas e

mesmo solos; aqui, a mineralogia varia grandemente e influencia o comportamento geotécnico, por exemplo, pela presença ou não de minerais de argila expansivos; (iii) remanejados artificialmente, obtidos pela escavação e colocação de solos e rochas como materiais granulares; neste caso, os solos podem ser considerados como materiais de construção civil compostos de partículas que podem ser entendidas como elementos minerais individualizados ou como fragmentos de rochas.

Não se considerando os solos remanejados artificialmente, frutos da ação direta do homem sobre as ocorrências naturais de solos e rochas, a divisão de solos apresentada por Vaughan (1994) pode ser, também, aplicada aos solos brasileiros, onde é comum ter-se um perfil típico composto por um sistema de uma camada, sendo esta de solo residual, ou de duas camadas, onde uma camada de solo transportado cobre uma outra de solo residual.

O comportamento geotécnico de um solo pode se enquadrar em comportamentos particulares, que exigem critérios de avaliação específicos, bem como em padrão considerado normal, passível de previsão pelos sistemas de classificação geotécnica tradicionais, com destaque para o TRB (*Transportation Research Board*) (DNIT, 2006) e o USC (*Unified Soil Classification*) (VARGAS, 1977), podendo-se referir, também, à Metodologia MCT (*Miniatura Compactada e Tropical*) (NOGAMI et al., 1995). Nos solos de comportamentos particulares, enquadram-se, por exemplo, os solos classificados como expansivos, colapsíveis, dispersíveis, argilas orgânicas moles e argilas sensíveis.

### **2.1.2. Visão pedológica**

O solo é constituído por minerais e poros (ocupados por água e ar), além de matéria orgânica e organismos vivos, sendo que a proporção de cada uma dessas partes podem variar significativamente. A fração mineral pode ser constituída de partículas de diversos tamanhos, desde argila até matações. Na fração argila é onde ocorre grande parte das reações de troca iônica. Existe, ainda, uma camada de solo mais superficial que apresenta um

pronunciado teor de matéria orgânica, que é responsável por fornecer boa parte dos nutrientes que as plantas necessitam para o seu desenvolvimento (FOTH, 1990).

O solo é variável nas três dimensões, sendo comum a sua divisão em diferentes horizontes ou camadas, ao longo da profundidade (RESENDE et al., 2002). Costa (2004) define os horizontes como porções de limites geralmente algo irregulares, mas em geral, sensivelmente paralelos à superfície do terreno, que se diferenciam devido à influência de agentes atmosféricos e soluções formadas pelas águas das chuvas, em íntima ligação e profundidade variável, com influências biológicas atuando no local. Esses horizontes são diferenciados por uma série de características, tais como: constituição, cor, textura, estrutura, cerosidade porosidade, consistência, atividade biológica, dentre outras (FOTH, 1990; RESENDE, et al., 2002). Para as suas diferenciações, utilizam-se em geral as letras maiúsculas O, A, E, B, C e R, sendo que cada horizonte possui suas características típicas, como segue (FOTH, 1990):

- Horizonte O, que é um horizonte orgânico, composto basicamente por matéria orgânica fresca ou em decomposição provinda da vegetação que ocupa a superfície do solo e de outros organismos em decomposição;
- Horizonte A, que é composta de material mineral que tende a apresentar coloração escura se aproximando da apresentada pelo húmus, devido à proximidade da superfície;
- Horizonte E: horizonte mineral, com coloração mais clara que a do horizonte A, devido à movimentação de partículas finas (argila e óxidos de ferro) para o horizonte B (processo conhecido por eluviação), resultando em uma maior concentração de areia e partículas maiores de quartzo no tamanho de silte;
- Horizonte B, que está compreendido entre os horizontes A e C e representa um estágio de intemperismo intermediário entre esses dois horizontes. Nessa camada, surgem os minerais de argila (por exemplo, caulinita), os nutrientes iônicos e, também, a presença de óxidos de ferro (por exemplo, goethita) e de alumínio (por exemplo, gibbsita);

- Horizonte C, que é o horizonte mineral formado por solo caracterizado por pequeno grau de alteração, com pouca influência de organismos vivos, e apresentando normalmente composições química e mineralógica semelhantes ao material de origem;
- Horizonte R: material mineral rochoso, representando a rocha inalterada semelhante à rocha-mãe a partir da qual se formou a referida camada.

Cada solo possui características próprias, o que o diferencia dos outros, podendo-se referir à cor, constituição granulométrica, estrutura e comportamentos físico e químico.

A cor de um solo é uma de suas características mais fáceis de serem percebidas. Com relação aos solos tropicais, por exemplo, a presença de óxidos de ferro, com tons variando de amarelo a avermelhado, e de matéria orgânica, no tom cinzento, são os principais agentes responsáveis pela coloração. De um modo geral, a cor dos solos relaciona-se com padrões de drenagem, presença de matéria orgânica, forma e conteúdo de ferro, fixação de fósforo e fertilidade (COSTA, 2004).

Granulometricamente, o solo é constituído por partículas de diferentes tamanhos, que são comumente divididas e denominadas de argila, silte, areia e pedregulho. A textura refere-se à proporção dessas frações na constituição do solo, sendo que a sua distribuição está intimamente ligada à rocha de origem, ao grau de intemperismo e à idade do solo em questão. Além da constituição mineralógica de cada uma de suas frações, refere-se que outras propriedades de um solo dependem da sua textura (FOTH, 1990).

Segundo Resende et al. (2002), é comum que as partículas primárias de um solo, isto é, argila, silte e areia, se encontrem agrupadas, formando partículas maiores, denominadas de agregados, que lhes conferem a sua estrutura. Sobre a estrutura dos solos pode-se expor que: (i) os óxidos de ferro e alumínio, a matéria orgânica e o excesso de sais tendem a produzir estruturas granulares; (ii) a expansão e a contração de materiais mais ou menos ricos em argila, quando expostos a ciclos de umedecimento e secagem, tendem a destruir estruturas granulares, dando

origem a estruturas em blocos; (iii) a taxa de infiltração de água tende a ser maior no horizonte B do que no horizonte A, por exemplo, para os latossolos; (iv) os materiais que apresentam estrutura granular tendem a ter o mínimo de coesão entre os grãos que, se forem pequenos, podem ser facilmente deslocados pela água, do que resulta, por exemplo, a condição exibida por Latossolos mais ricos em óxidos de ferro e de alumínio de apresentarem relativa tendência à erosão; e (v) solos pobres em óxidos de ferro e alumínio tendem a apresentarem estruturas diferentes do tipo granular. Com relação aos seus vazios, um solo apresenta poros com tamanho, número, distribuição e continuidade variáveis, que são divididos em micro e macroporos. A cimentação entre grãos oferece restrição à movimentação de água e à penetração de raízes, por exemplo.

Em termos de comportamentos físico e químico, o solo é um sistema dinâmico sujeito às flutuações que englobam mudanças nos seus componentes, condições de pH, potencial redox e alterações graduais em resposta às mudanças nos fatores ambientais e de manejo. Por outro lado, destaca-se que o solo apresenta variabilidade espacial, às vezes, marcante nas suas propriedades físicas e químicas, em micro e macro escalas (COSTA, 2004).

### **2.1.3. Visão mineralógica**

Minerais são compostos naturais inorgânicos, com propriedades físicas e químicas definidas, sendo agrupados largamente em dois grandes grupos, os minerais primários e os secundários. Os minerais primários são aqueles que não foram alterados quimicamente desde sua cristalização no resfriamento da lava. Os minerais secundários são os que resultam da decomposição dos minerais primários ou da precipitação da decomposição dos produtos minerais, tudo isso resultado da ação do intemperismo (FOTH, 1990). Segundo esse autor, devido ao tamanho pequeno dos minerais secundários, eles dominam a fração argila do solo, sendo essa a fração ativa do mesmo, ou seja, é onde ocorrem os processos de troca e todo processo de reações químicas. Sabe-se, ainda, que existe uma grande quantidade de

elementos químicos que estão distribuídos na crosta terrestre; assim, imagina-se a grande variedade de minerais que podem-se formar com a combinação destes elementos.

Segundo Fang (1997), do ponto de vista micro-estrutural, os solos são compostos, primariamente, de sílica e alumínio ou óxidos de ferro. As camadas de minerais de argila silicatados são constituídas por, fundamentalmente, unidades estruturais, com camadas de sílica e gibbsita ou brucita que apresentam em sua constituição, basicamente, oxigênios estruturais que são ligados por Si, Al, Mg e outros cátions. Os minerais argilosos são formados por várias combinações dessas unidades, denominadas unidades cristalográficas, que podem ser tetraédricas ou octaédricas, recebendo estas designações em função das suas formas geométricas, podendo-se identificar, por exemplo, os grupos da caulinita, da montmorilonita e da illita. As primeiras são constituídas, de Si rodeado por quatro O e as segundas são formadas por Al, Mg, Fe, dentre outros, rodeados por oito O.

Essas lâminas de minerais de argila se combinam entre si, podendo formar minerais classificados como dos tipos 1:1 e 2:1. Ao se combinarem, essas unidades cristalográficas dão origem a cargas elétricas, negativas ou positivas, sendo mais freqüentes as negativas. Assim, as ligações catiônicas não fornecem cargas positivas em número suficiente dentro da estrutura do mineral, ocorrendo, pois, o excesso de cargas negativas que deve ser satisfeito, superficialmente, por adsorção de íons positivos do meio ambiente.

Em casos de regiões de clima tropical, são muito comuns os latossolos e nesses, os minerais mais comumente encontrados de acordo com Fontes (2006a) são:

- caulinita, que é o mineral de maior importância, sendo encontrado na fração argila;
- goethita e hematita, que são óxidos de ferro predominantes na fração argila, ocorrendo o segundo em percentual menor;
- gibbsita, que é um óxido de alumínio presente na fração argila;
- quartzo, que está presente nas frações silte e areia.

### 2.1.3.1. Caulinita

A caulinita é um mineral de argila silicatado do grupo dos filossilicatos. Ela possui em sua morfologia uma forma hexagonal, o que se pode observar em cristais bem formados, produto da disposição das lâminas de tetraedros de silício e de octaedros de alumínio (DEER et al., 1992).

Sua formação é devido à decomposição dos minerais primários em condições de intemperismo moderado a fortemente ácido com remoção de bases, onde as condições de drenagem e lixiviação são também moderadas, favorecendo a perda de sílica e de cátions do sistema, assim contribuindo para a gênese da caulinita, principalmente; ou seja, é um produto resultante de um estágio avançado de intemperismo em relação aos outros minerais silicatados. Há ainda a possibilidade da caulinita se formar a partir de feldspatos, devido a mudanças no meio (FONTES, 2006a).

As estruturas dos minerais de argila silicatados possuem grande número de características em comum. Estas estruturas são baseadas na composição de camadas constituídas por cátions organizados em octaedros e tetraedros. A maioria desses minerais de argila silicatados ocorre em partículas na forma lamelar ou prato, com finos agregados, formando juntamente com a água, um conjunto de diferentes graus de plasticidade (DEER et al., 1992). De acordo com esses autores, devido às diferenças significativas entre os minerais de argila silicatados, eles foram divididos em vários grupos, onde se pode citar como os quatro mais importantes caulinita, illita, esmectita e vermiculita. A caulinita é o membro mais importante para esse estudo, sendo a haloisita a sua forma hidratada, diferenciada apenas pelas moléculas de água que a hidrata. Existem, ainda, outros minerais que fazem parte desse grupo, como é o caso da dickita e da nacrita.

A caulinita pode no seu processo de evolução, sofrer substituição isomórfica, que é o caso do ferro, que pode substituir o alumínio na sua estrutura. Esse mineral apresenta cargas de superfície, que se desenvolvem com o aumento do pH do meio, caracterizando como colóides de carga variável, dependendo das condições de concentração no meio dos íons ( $H^+$  ou  $OH^-$ ) (FONTES, 2006a).

### 2.1.3.2. Goethita e hematita

Em geral, nota-se um interesse significativo em se estudar os óxidos de ferro em solos brasileiros, uma vez que se refere aos materiais formados, em geral, sob a ação de climas tropical e subtropical.

Fontes (2006a) destaca como os principais óxidos de ferro encontrados em solos brasileiros a hematita ( $\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), a goethita ( $\alpha - \text{FeOOH}$ ), a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), a maghemita ( $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e a ferridrita ( $5\text{Fe}_2\text{O}_3 - 9\text{H}_2\text{O}$ ). Há, entre esses óxidos presentes, uma busca pela estabilidade mineralógica, sendo a goethita e a hematita os dois óxido de ferro mais estáveis.

No processo de formação de solos tropicais e subtropicais, em destaque os solos brasileiros, há uma abundância de óxidos de ferro e alumínio no meio. Segundo Fontes (2006a), esses óxidos estão ligados, diretamente, a características tecnológicas de interesse do solo, podendo-se referir ao grau de intemperismo (mineralogia), estrutura (comportamento geotécnico), capacidade de adsorção de anions (agrícola) e adsorção de metais pesados (geoambiental). Destaca esse autor que nesses solos são, comumente, encontrados nódulos ou conglomerados de partículas que formam estruturas floculadas, que lhes garantem um bom comportamento mecânico, além de possuir um alto poder pigmentante que influi nas suas colorações, sendo o amarelo, o vermelho, o roxo e tons intermediários as cores típicas.

Segundo Costa (2004), as reações de retenção de íons pelo solo, principalmente, devem-se à presença de óxidos hidratados de ferro, o que os torna de grande interesse em estudos geoambientais. A goethita é a forma mais freqüente dos óxidos de ferro nos solos brasileiros, ocorrendo em quase todos os tipos de solos e condições climáticas. Esse óxido é responsável pela coloração amarela e bruno - amarela de solos brasileiros. Já a hematita é responsável por uma coloração mais escura, do vermelho ao roxo, com alto poder pigmentante mesmo a baixas concentrações. Assim, como é comumente encontrada na natureza junto com a goethita, prevalece sua coloração, sendo típica de ambientes bem drenados (RESENDE et al., 2002).

### **2.1.3.3. Gibbsita**

A gibbsita é resultado de um processo de intemperismo avançado do solo, sendo um mineral mais estável. Esse mineral pode-se originar de materiais menos estáveis como a mica e feldspato, passando por seqüências intermediárias de minerais de argila, ou surgir diretamente de minerais de argila silicatados e de alumínio. No mineral gibbsita, pode haver formação de cargas na suas bordas dependente do pH do meio, de acordo com a protonação ou desprotonação dos grupos hidroxila de superfície (COSTA, 2004; FONTES, 2006a).

### **2.1.3.4. Quartzo**

O quartzo é um mineral primário, que está presente na fração areia de quase todos os solos. Esse aspecto confirma a sua enorme resistência à ação ao intemperismo, não se decompondo e sim se fragmentando ao longo de todo o processo de evolução de um perfil de solo (GRIM, 1968).

O quartzo está presente na maioria das rochas ígneas, metamórficas e sedimentares; do ponto de vista agrícola, não tem importância como fornecedor de nutrientes as plantas, mas sim como constituinte do arcabouço físico do solo, por exemplo, facilitando a aeração (FONTES, 2006a).

## **2.2. Solos da Microrregião de Viçosa com direcionamento ao LVA**

### **2.2.1. Latossolos Vermelho-Amarelo (LVA)**

Ker (1997) refere que o termo *latossolo* agrupa solos muito intemperizados das regiões tropicais, sendo que com o desenvolvimento do sistema norte-americano de classificação de solos, esses materiais foram agrupados na ordem dos oxisols. No presente texto, opta-se por se manter a denominação latossolo em detrimento de oxisols. Esse autor, descrevendo

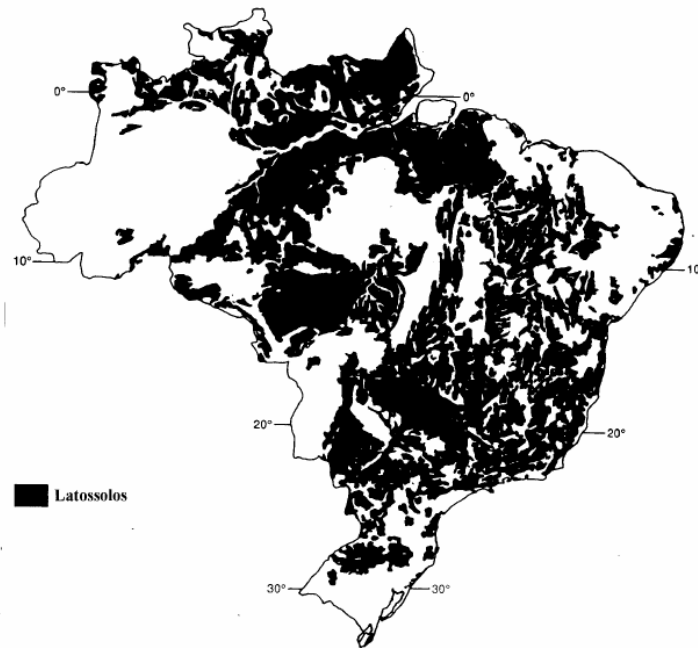
as características do horizonte B latossólico, cita a versão da EMBRAPA-SNLCS<sup>1</sup>, de 1988, como segue:

- apresenta espessura mínima de 50 cm, textura mais fina que franco arenosa com baixos teores de silte, de maneira que a relação silte/argila seja menor que 0,7;
- apresenta na fração < 0,05 mm, corrigidos para fração TFSA, menos de 4% de minerais primários facilmente decomponíveis ou menos de 6% de muscovita; admite-se a presença de pequenas quantidades de minerais de argila inter-estratificados e, ou, ilita, na fração menor que 0,005 mm (silte mais argila), porém não deve conter mais do que traços de minerais do grupo das esmectitas;
- a relação molecular  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  (Ki) deve ser menor que 2,2;
- não deve apresentar mais que 5% do volume ocupado por materiais pouco alterados, ainda guardando resquícios do material de origem;
- grande estabilidade de agregados, sendo o grau de floculação igual ou próximo de 100%, à exceção dos horizontes mais ricos em matéria orgânica ou eletropositivos;
- CTC menor que 13 cmol<sub>e</sub>/kg, descontando-se a participação do carbono orgânico;
- pouca diferenciação entre sub-horizontes.

Os latossolos são solos de grande ocorrência no Brasil, como se depreende na Figura 1. Dentre esses, uma classe de interesse geotécnico significativo engloba os designados por Latossolos Vermelho-Amarelo (LVA), que ocupam parcela significativa do território brasileiro, como se ilustra na Figura 2. Refere-se que o termo LVA designa os latossolos que possuem cor laranjada, com matiz Munsell entre 2,5YR e 5YR. Nesses solos, o matiz amarelado é causado pela presença da goethita, destacando-se que eles podem apresentar textura variável, desde média até muito argilosa.

---

<sup>1</sup> Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Critérios para distinção de classes de solos e de fases de unidade de mapeamento, normas em uso pelo SNLCS.** Rio de Janeiro, EMBRAPA-SNLCS, 1988. 67p.



**Figura 1.** Distribuição das áreas de ocorrência de latossolos no Brasil (CAMARGO et al., 1986<sup>2</sup>; apud KER, 1997).



**Figura 2.** Distribuição de LVA no Brasil (KER 1997).

Segundo Oliveira et al. (1992), os LVA abrangem solos minerais não hidromórficos com horizontes B latossólicos, teor de ferro proveniente do ataque sulfúrico na fração menor que 2 mm igual ou inferior a 11% e,

---

<sup>2</sup> Camargo, M.N.; Klamt, E.; Kauffman, J.H. **Classificação de solos usada em levantamento pedológico no Brasil.** Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, 12(1): 11-33, 1987.

normalmente, maior do que 7%, quando a textura é argilosa ou muito argilosa, enquanto que nos de textura média, a relação molecular  $Al_2O_3/Fe_2O_3$  proveniente do ataque sulfúrico é maior do que 3,14. Complementam esses autores que esses solos são normalmente porosos, mesmo aqueles com teores elevados de argila, bem como que a textura é muito variada, havendo registro de teores de argila variando de 15% até 80%.

Com relação à estrutura, fator de influência significativa na condutividade hidráulica dos solos, em geral, os latossolos brasileiros possuem micro-agregados constituídos por partículas muito finas, orientadas de forma aleatória, formadas por assembléias dos minerais caulinita e gibbsita envelopadas e cimentadas por oxihidróxidos de ferro responsáveis pela estabilidade de sua organização (SCHAEFER, 2001).

Sabe-se, também, que além da estabilidade natural das partículas finas, os latossolos podem estar sujeitos aos efeitos da sucção, quando o teor de umidade encontra-se no ramo seco e, mesmo, próximo ao ponto ótimo da curva de compactação, o que pode resultar em aumentos significativos nas suas tensões efetivas. Os micro-agregados de argila presentes nesses solos possuem em seu interior uma grande quantidade de vazios, que são eliminados somente após a aplicação de um elevado esforço de compactação capaz de quebrá-los.

Por outro lado, com base em resultados de ensaios de compactação, resistência mecânica e micro-morfológicos realizados em um LVA da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, Trindade (2006) relata que a aplicação de energia de compactação elevada (Proctor modificado) promoveu o aparecimento de vazios fissurais muito pequenos, próximos uns dos outros e orientados perpendicularmente ao eixo de compactação. Nesses materiais, esse autor ressalta que nem sempre se pode obter uma resistência mecânica maior com a aplicação de um esforço de compactação maior, pois se pode produzir mudança estrutural significativa e, mesmo, ruína da microestrutura natural do solo que, em geral, apresenta boa resistência mecânica em sua condição natural de ocorrência.

### **2.2.2. Solos da microrregião de Viçosa**

Formada sob a atuação de processos geomorfológicos ligados a condições climáticas que se alteram em períodos ora mais úmidos ora mais secos e marcada por ciclos sucessivos de erosão atuantes sobre uma antiga superfície de aplainamento (CORRÊA, 1984; RESENDE, 1971) a microrregião da cidade de Viçosa, localizada na Zona da Mata Norte de Minas Gerais, Brasil, caracteriza-se por uma topografia fortemente acidentada, apresentando proporções reduzidas de áreas planas, quase restritas aos terraços e leitos maiores. Segundo esses autores, nas partes íngremes, as encostas desenvolvem-se em seqüência côncavo-convexo-topo, contrastando com os fundos de vale, com relação às características pedológicas.

As elevações, de modo geral, as partes íngremes, onde o horizonte C está mais próximo à superfície, estão ocupadas por cambissolos-latossólicos, enquanto que nos topos e nas encostas mais suavizadas dominam os Latossolos Variação Una, hoje integrando a classe dos Latossolos Vermelho-Amarelo (LVA). Os LVA de Viçosa apresentam grande expressão territorial, mostram-se bastante intemperizados e lixiviados, com perfis profundos ou muito profundos de seqüência de horizontes A-B-C, com diferenciação dos horizontes e horizonte B latossólico. Esses materiais são provenientes de gnaiss e, normalmente, apresentam texturas variando de argilo-areno-siltosa a areno-argilo-siltosa.

Os terraços, onde se concentram parte das atividades humanas da microrregião, são dominados por solos desenvolvidos em material mais argiloso, proveniente das encostas e depositado em ambientes de águas calmas (CORRÊA, 1984). Esses materiais têm sido classificados como Podzólicos Vermelho-Amarelo Câmbicos.

Nas posições mais baixas, margeando os cursos de água que cortam os terraços e periodicamente inundáveis, estão presentes os solos aluviais formados por deposição recente e denominados hidromórficos. São solos de topografia plana, que se encontram no leito maior das linhas de drenagem, às margens dos cursos de água ou partes baixas do terreno, sob condição de saturação de água ou alagamento temporário, formados a partir

do pequeno volume de água que drenam os vales (CORRÊA, 1984), que apresentam como características principais cores acinzentadas.

Os cambissolos são de ocorrência predominante nas vertentes mais íngremes do relevo montanhoso (QUINTEIRO, 1997), apresentam, normalmente, horizonte B de pequena espessura e são considerados solos rasos, com o horizonte C geralmente exposto.

Na constituição mineralógica dos solos de Viçosa, há predomínio de caulinita, goethita e, em menor proporção, gibbsita e hematita, além de quartzo. Nas frações silte e areia, teores de gibbsita são relativamente altos nas cotas mais elevadas, como relata Pinto (1971).

Especificamente, com relação aos LVA de Viçosa, estes são solos residuais provenientes de gnaisses e decorrentes da grande alternância climática entre períodos mais úmidos e mais secos. Normalmente, apresentam textura argilo-areno-siltosa a areno-argilo-siltosa. Mineralogicamente, esses LVA exibem predominância de caulinita, em especial, goethita, hematita e traços de gibbsita, sendo que a maior presença de hematita e a ocorrência de goethita lhes conferem tonalidades mais avermelhadas, o que é uma característica da ocorrência deste mineral no perfil, como relata Cardoso (1994).

Informações geotécnicas de interesse sobre os LVA de Viçosa são, como segue:

- Cardoso (1994), estudando aspectos geotécnicos ligados à expansibilidade de quatro ocorrências de LVA, encontrou texturas areno-argilosa para três amostras e argilo-arenosa para uma amostra, com o limite de liquidez variando de 63% a 78% e o IP de 20% a 33%. De acordo com as classificações de solos USC e TRB, todas as amostras enquadraram-se nos grupos MH e A-7-5, respectivamente, com índice de grupo variando de 9 a 17 (classificação TRB);
- Ramalho (1994) determinou, em ensaio de cisalhamento direto inundado realizado em um LVA, coesão de 15 kPa e ângulo de atrito de 26°;
- Ferraz (1994), analisando solos da região para estudos de estabilização química para fins rodoviários, determinou, para dois LVA, os parâmetros geotécnicos apresentados na Tabela 1

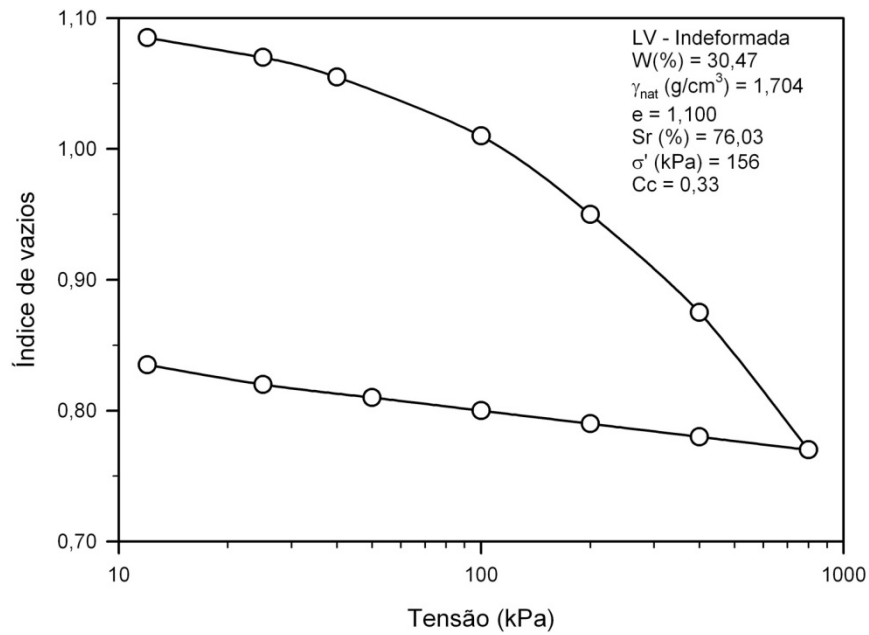
**Tabela 1.** Resultados de ensaios de caracterização de dois Latossolos Vermelho-Amarelo de Viçosa-MG (FERRAZ, 1994)

Parâmetros Geotécnicos	Latossolos Vermelho-Amarelo de Viçosa –MG	
	Estação de Tratamento de Água (ETA)	Nova Viçosa (NV)
LL (%)	63	70
LP (%)	33	48
IP (%)	30	22
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	27,25	27,48
W <sub>ot</sub> (%) - Proctor normal	31,6	30,80
$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> ) - Proctor normal	14,06	14,00
CBR (%) – Proctor normal	11	8
EXP <sub>CBR</sub> (%)	0,1	0,1
TRB	A-7-5 (20)	A-7-5 (9)

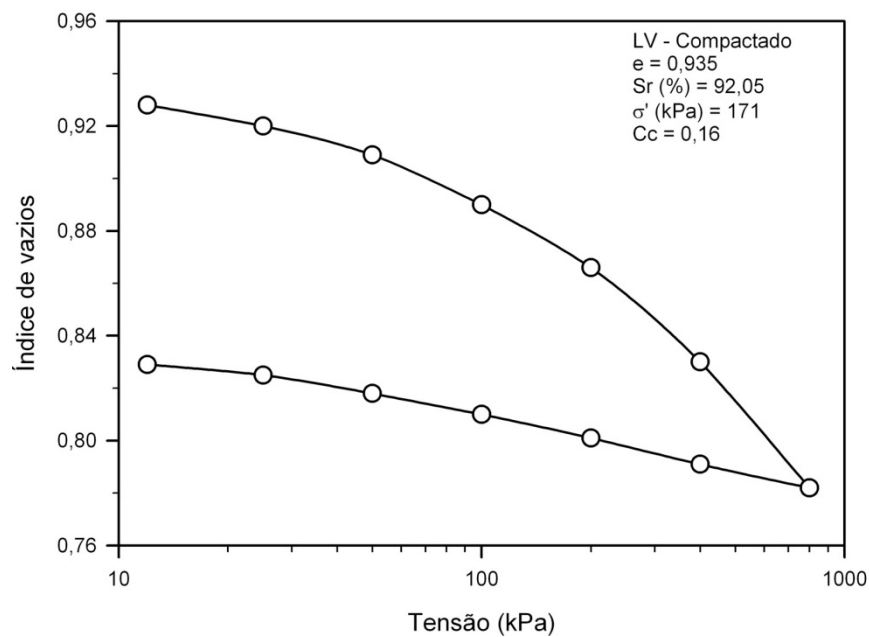
- Azevedo (1999) realizou ensaios geotécnicos em um LVA, obtendo: (i) dados de ensaios triaxiais consolidados não drenados realizados em amostras indeformadas (ensaios CU e CU<sub>sat</sub>) e em amostras compactadas nos parâmetros ótimos de compactação da energia do ensaio Proctor normal (ensaios CU), para tensões de confinamento na faixa de 100 a 350 kPa, como se apresenta na Tabela 2; (ii) dados de ensaios de compressão edométrica realizados com amostras indeformada e compactada na energia do ensaio Proctor normal, sob tensões verticais na faixa de 12 kPa a 800 kPa, como se ilustra nas Figuras 3 e 4.

**Tabela 2.** Índices físicos dos corpos-de-prova e resultados dos ensaios triaxiais consolidados não drenados realizados em um Latossolo Vermelho-Amarelo de Viçosa-MG, considerando amostras indeformadas e amostras compactadas na energia do ensaio Proctor normal (AZEVEDO, 1999)

Solo	Amostra	Tipo de ensaio	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	S <sub>r</sub> (%)	W (%)	e	$\phi$ (°)	C (kPa)	$\phi'$ (°)	C' (kPa)
	Indeformada	CU	16,33	-	67,56	28,52	1,15	10,24	259,03	-	-
LVA	Indeformada	CU <sub>sat</sub>	16,64	-	67,03	26,56	1,12	-	-	14,17	38,46
	Compactada	CU	-	12,91	88,90	31,5	0,972	19,87	167,10	-	-



**Figura 3.** Curva tensão versus índice de vazios do LVA, amostra indeformada (AZEVEDO, 1999).



**Figura 4.** Curva tensão versus índice de vazios do LVA, amostra compactada (AZEVEDO, 1999).

### 2.3. Dupla camada difusa

A fração argila é de grande importância na descrição do comportamento geotécnico dos solos, por ser a sua fração ativa e que participa da maioria de suas reações físico-químicas.

Um dos atributos mais importantes dos minerais da fração argila é o seu estado coloidal, caracterizado por possuir cargas elétricas de superfícies que são neutralizadas por íons, grande área superficial (elevada superfície específica), movimento Browniano e dispersão da luz (FONTES, 2006b).

De modo geral, as partículas de argila em suspensão apresentam cargas elétricas negativas de superfície, que são neutralizadas por cátions. Mas como se dá essa distribuição de cargas, à medida que se afasta das partículas?

Como destaca Fontes (2006b), apesar de a tendência natural ser de que os cátions sejam atraídos o mais perto possível das partículas, o que se observa é uma alta concentração de cátions próximos das suas superfícies devido a forças de difusão, movimento térmico, pressão osmótica, dentre outras considerações. Há, ainda, a ação de forças de atração eletrostática, que são forças entre partículas carregadas negativamente e os cátions carregados positivamente. Os cátions se distribuem uniformemente sobre a superfície do mineral de argila e, à medida que se afastam perpendicularmente ao plano da face, reduz-se a sua concentração.

Segundo Costa (2004) e Fontes (2006b), há vários modelos que tentam descrever a dupla camada de cargas, podendo-se referir ao de Helmholtz, ao de Gouy-Chapman e ao de Stern.

O modelo de Helmholtz é uma das mais antigas explicações sobre a dupla camada de cargas. Nesse modelo se assume que as cargas que neutralizam as partículas distribuem-se uniformemente a uma distância definida, em um plano paralelo à superfície negativamente carregada da partícula. A distribuição do potencial elétrico apresenta uma queda linear, à medida que se afasta da superfície da partícula, ou seja, na superfície o potencial é máximo e, a partir desta, ele decresce, até atingir o valor zero.

Já no modelo de Gouy<sup>3</sup> – Chapman se postula que as cargas das partículas se distribuem uniformemente sobre as suas superfícies, que não há uma distância definida entre estas e os íons que neutralizam seus pontos de carga e que estes íons não ocupam espaços, não possuem volumes,

---

<sup>3</sup> GOUY, G. **Sur La constitution de La charge electrique à La surface d'um electrolyte.** *Journal de Physique*, 9 (4):1910. p 457-468

bem como que todos os íons monovalentes se comportam de maneira similar, assim como os divalentes. A distribuição de cargas deixa de ser linear, à medida que se afasta da partícula e o potencial elétrico decresce exponencialmente à medida que se afasta da superfície do mineral, chegando-se a uma expressão matemática que relaciona os fatores que influenciam a dupla camada de cargas, como destaca Mitchell (1993), podendo-se a referir a: (i) constante dielétrica do meio em que, permanecendo constantes os outros fatores de interesse, um aumento neste parâmetro provoca uma maior espessura na dupla camada difusa; (ii) temperatura em que, permanecendo constantes os outros parâmetros de interesse, um aumento neste parâmetro produz um aumento na espessura da dupla camada difusa; (iii) valência do cátion em, na constância dos demais fatores, um aumento neste parâmetro leva a uma redução na espessura da dupla camada difusa, mas destacando-se que, em concentrações equivalentes de eletrólitos, cátions monovalentes nas posições de troca geram uma dupla camada difusa mais espessa do que cátions divalentes; (iv) concentração na solução externa em que, não se alterando os outros fatores de interesse, um aumento neste parâmetro leva a um decréscimo na espessura da dupla camada difusa.

Devido às limitações dessa última teoria, principalmente pelo fato de se considerar que os íons são pontos de carga e que não ocupam espaço, surgiu o modelo de Stern<sup>4</sup>, que congrega aspectos das duas primeiras teorias. Nesse modelo se considera a ocorrência de uma camada mais interna de menor espessura, que recebe a denominação de camada de Stern, e de uma nuvem de íons, denominada camada difusa de íons. Nessa teoria o potencial elétrico decresce linearmente até atingir a camada de Stern, após a qual decresce exponencialmente, à medida que se afasta da superfície da partícula (FONTES, 2006b).

---

<sup>4</sup> STERN, O. **Zur Theorie der electrolytischen Doppel schicht.** *Zeitschrift fur Elektrochemie der angewandte Physikalische Chemie*, 1924. 30:508-516.

## **2.4. Solos modificados**

Em cada solo existem diversos íons, sendo que os mesmos podem controlar uma ou várias de suas propriedades geotécnicas de interesse. É a partir dessa concepção que Fang (1997) dá início à idéia de se produzir o que ele denominou de *solos fabricados pelo homem* (“man made soils”).

Certamente, a influência da composição do mineral de argila e os íons adsorvidos em um solo, são elementos importantes na sua seleção, para fins de produção dos solos fabricados. A facilidade de clivagem das suas finas lamelas e/ou a facilidade de penetração de água entre esses espaços influenciam, também, na escolha. A adsorção pode, largamente, controlar o comportamento de engenharia do solo natural, e a extensão do desenvolvimento de sua água orientada e os seus componentes catiônicos inorgânicos são, provavelmente, de importância expressiva no processo.

Com vistas a aplicações geotécnicas, um problema prático relativo ao processo de produção de solos fabricados, segundo a visão de Fang (1997), está na dificuldade de se criar uma interface adequada entre a metodologia utilizada em estudos de laboratório e aquela necessária para a produção de grandes volumes desses materiais no campo.

Este é um tema relativamente novo na engenharia geotécnica brasileira e internacional e, certamente, antevê-se a necessidade de uma ampliação dos horizontes da idéia inicial de Fang (1997), acrescentando-se à mesma a dimensão das alterações estruturais via mudanças na mineralogia e incorporando-se no processo uma metodologia que possa ser, com relativa simplicidade, implementada no campo.

### **2.4.1. Processos de troca iônica**

Os processos de troca iônica são de grande importância para várias áreas do conhecimento, em especial no que tange ao estudo nutricional das plantas (as reações de troca são de grande importância para o crescimento das plantas) e para o emprego do solo como material de construção civil (as reações de troca mudam significativamente o seu comportamento de

engenharia). Esses processos podem nas formas de trocas catiônica e aniônica. Em geral, os cátions trocáveis mais conhecidos são  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{Na}^+$ , ao passo que os ânions são  $\text{SO}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  e  $\text{NO}_3^-$  (GRIM, 1968).

Denomina-se troca iônica ou adsorção iônica, este um caso característico de substâncias que se encontram no estado coloidal, ao processo em que íons retidos superficialmente em uma fase sólida são permutados com íons em solução em uma fase líquida, sem alteração sensível ou decomposição da primeira. Alguns fenômenos que ocorrem nos solos estão estritamente ligados à adsorção iônica, como o intemperismo de minerais, adsorção de nutrientes pelas plantas, floculação e dispersão de argilas, lixiviação de nutrientes e empobrecimento dos solos (COSTA, 2004).

Os minerais de argila silicatados e os colóides húmicos são os principais componentes dos solos que apresentam cargas elétricas negativas. São nessas partículas que os cátions são atraídos eletrostaticamente, formando a dupla camada de cargas. Assim, é chamada de CTC (Capacidade de Troca Catiônica) à capacidade de um solo de adsorver e permutar cátions. Com respeito à CTC, alguns aspectos qualitativos de interesse são (GRIM, 1968):

- reversibilidade: embora alguns cátions sejam preferidos, até os fortemente adsorvidos podem ser permutados, desde que a correta manipulação das condições da solução seja adequada. Por exemplo, no caso de partículas saturadas com íons cálcio, pode ocorrer permutação iônica aumentando-se a concentração de íons sódio na solução;
- estequiometria: o processo de permuta de íons é estequiométrico; no caso do exemplo anterior, para cada íon cálcio são necessários dois íons sódio;
- independência da temperatura: o ponto de equilíbrio nas reações de troca não depende da temperatura, assim como a velocidade com a qual estas se processam;
- velocidade: desde que os íons tenham acesso à superfície de troca, o processo é, praticamente, instantâneo; mas, se a difusão da superfície coloidal é requerida, o processo não é mais instantâneo.

Em situações de campo, onde o solo forma agregados e grande parte das posições de troca encontram-se dentro dos mesmos, há dificuldade no processo de troca, pelo fato de que o cátion tem de se mover pelos espaços vazios e poros tortuosos, até encontrar uma posição de troca e deslocar o segundo cátion.

- tamanho da partícula: de um modo geral, em minerais de argila com bordas quebradas, o tamanho da partícula influencia a CTC. À medida que diminui o tamanho do mineral, ocorre um aumento da capacidade de troca de cátions (devido ao fato de surgimento de mais posições de troca), ao passo que para minerais de argila que realizam suas trocas basicamente no plano basal de clivagem, não ocorre diferenças na CTC, quando varia o tamanho dos grãos do mineral.

Pode-se referir, também, aos principais fatores que afetam a CTC, a saber: (i) força de troca do cátion, que caracteriza o grau de permutação dos diferentes cátions que coexistem nos solos, sendo que em condições de equilíbrio a quantidade deslocada de cátion aumenta com o aumento da valência do cátion adicionado ao meio, bem como que, para uma mesma valência, o cátion de maior raio iônico desloca mais facilmente o cátion adsorvido; (ii) efeito do cátion complementar; (iii) efeito da diluição versus valência do íon; (iv) efeito do anion e ação das massas; (v) tipo do material coloidal presente (FONTES, 1990).

As cargas elétricas nas partículas de um solo estão intimamente ligadas à presença de partículas no estado coloidal, tanto aquelas orgânicas como inorgânicas. Em geral, essas cargas são dos tipos permanentes e variáveis. Destaca-se que as cargas permanentes são típicas dos minerais de argilas silicatados e resultam da substituição isomórfica. Esse tipo de carga não depende do pH, porque é uma propriedade intrínseca do mineral. Essas cargas são formadas devido à substituição de alguns cátions por outros de maior valência, o que gera um desequilíbrio e forma cargas negativas. Essa substituição se dá na formação dos minerais argilosos e é mais importante nos minerais 2:1. Ao contrário das cargas permanentes, as cargas variáveis são aquelas que dependem do pH, se originam nos colóides orgânicos ou nos colóides minerais, se manifestam e se

desenvolvem devido às mudanças no pH do meio ambiente (FONTES, 1990).

Refere-se que nos colóides minerais ou inorgânicos, as cargas variáveis ou dependentes de pH se devem principalmente a (FONTES, 1990; GRIM, 1968):

- presença de bordas quebradas: a formação das cargas através das bordas quebradas se refere ao fato de que a partícula coloidal tem que acabar em algum ponto e nesse ponto existem grupamentos OH que podem ser protonados ou não, dependendo do pH, e, conseqüentemente, podem gerar cargas;
- sítios de troca: a manifestação de cargas relacionadas ao bloqueio dos sítios de troca se refere à presença de minerais do tipo vermiculita, com hidróxido entre camadas, na fração argila do solo. Nesses minerais, há a presença das ilhas de hidróxido-Al que aparecem entre as camadas 2:1 e bloqueiam cargas negativas da vermiculita. Assim, apenas com um aumento do pH as cargas positivas do hidróxido-Al se neutralizam e liberam as cargas negativas da vermiculita. Cabe ressaltar que esse fenômeno interfere na CTC;
- óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos: esse mecanismo, de desenvolvimento de cargas negativas nos colóides inorgânicos refere-se à superfície de cargas variáveis, que são representadas principalmente pelos óxidos de Fe e Al. Recebem essa denominação por possuírem uma interface sólido - líquido de cargas reversíveis. Como exemplo, tem-se hematita, goethita e gibbsita, que possuem uma superfície hidroxilada que pode gerar cargas positivas ou negativas, de acordo com o excesso ou déficit de prótons, que é, por sua vez, função do pH. Esse tipo de carga dependente do pH é de importância significativa em solos altamente intemperizados, como os de climas tropical e subtropical.

### **2.4.2. Processos de mudança composicional**

A hipótese assumida no presente trabalho é que a composição mineralógica da fração argila dos solos pode ser modificada, sob determinados tratamentos. Assim, a composição dos latossolos pode ser modificada, por exemplo, pela eliminação de óxidos de ferro, como goethita e hematita, através de ataque de um conjunto de compostos, como, por exemplo, ditionito de sódio. Nesse caso, esse tratamento atua como extrator dos óxidos de ferro e faz com que a matriz que permanece no solo seja mais enriquecida de minerais de argila, o que pode modificar significativamente o seu comportamento geotécnico.

## **3. Materiais e Métodos**

---

### **3.1. Materiais**

Apresenta-se na seqüência os materiais que foram utilizados no presente trabalho, sendo ele o Latossolo Vermelho Amarelo, o ditonito de sódio e os sais NaCl e CaCl<sub>2</sub>.

#### **3.1.1. Solo**

No presente estudo, trabalhou-se com um solo residual de gnaissado maduro da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, pedologicamente classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), que já foi utilizado em pesquisas prévias desenvolvidas nos Departamentos de Engenharia Civil (DEC) e de Engenharia Florestal (DEF) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), podendo-se referir aos trabalhos de Vieira (1994), Azevedo (1999), Fernandes (2000), Sant'Anna (2002), Sant'Ana (2003), Lima et al. (2003) e Trindade (2006). Essa classe de solo constitui parcela significativa do relevo da microrregião de Viçosa, da Zona da Mata Mineira e do Brasil, apresenta estrutura granular forte, aspecto poroso, com textura argilo-areno-siltosa e fração argila composta, significativamente, pelos minerais caulinita, goethita e gibbsita (TRINDADE, 2006).

As amostras desse solo foram coletadas, em um talude de corte, no horizonte B, localizado no lado direito (sentido Viçosa - Paula Cândido) da rodovia que liga os municípios de Viçosa e Paula Cândido, próximo à Uina de Pré-Misturado a Frio da cidade de Viçosa, Minas Gerais, como se ilustra na Figura 5.



**Figura 5.** Local de coleta da amostra do solo residual maduro, pedologicamente classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA).

### 3.1.2. Ditionito de sódio

Com vistas à realização das modificações mineralógicas por extração de óxidos de ferro do LVA, utilizou-se o reagente químico denominado ditionito de sódio ou hidrossulfito de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ), que é um produto de forte poder redutor que reage na presença da água e ar com liberação de calor. Ele é comercializado na forma de pó, com coloração branca a branca acinzentada, e apresenta odor penetrante forte de dióxido de enxofre. À temperatura ambiente ( $20^\circ\text{C}$ ), esse produto apresenta pH na faixa de 7-9, densidade de  $2,38 \text{ g/cm}^3$  e solubilidade de  $250 \text{ g/l}$ . É um produto que apresenta perigo de inflamação, podendo, em presença de pouca água ou se aquecido a temperaturas superiores a  $100^\circ\text{C}$ , entrar em ignição.

### 3.1.3. Sais: $\text{NaCl}$ e $\text{CaCl}_2$

Para a realização das modificações no complexo de troca do LVA, utilizou-se os sais  $\text{CaCl}_2$  e  $\text{NaCl}$  comercializados pela empresa VETEC, que apresentam as especificações técnicas da Tabela 3.

**Tabela 3.** Especificações técnicas dos sais ( $\text{CaCl}_2$  e  $\text{NaCl}$ ) utilizados no presente estudo

<b>Cloreto de Cálcio P.A. Dihidratado</b>	Garantia do Produto	Fórmula molecular	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
		Peso molecular	147,01 g
		Teor (Como $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	99,0 - 105,0%
		pH (Sol 5% a 25°C)	4,5 - 8,5
		Materiais Insolúveis	Máx. 0,01%
		Subst. oxidantes (Como $\text{NO}_3$ )	Máx. 0,003%
		Sulfato ( $\text{SO}_4$ )	Máx. 0,01%
		Amônio ( $\text{NH}_4$ )	Máx. 0,005%
		Bário (Ba)	Máx. 0,005%
		Metais Pesados (como Pb)	Máx. 5 ppm
		Ferro (Fe)	Máx. 0,001%
		Magnésio (Mg)	Máx. 0,005%
		Potássio (K)	Máx. 0,02%
		Sódio (Na)	Máx. 0,02%
<b>Cloreto de Sódio P.A.</b>	Garantia do Produto	Fórmula molecular	$\text{NaCl}$
		Peso molecular	58,44 g
		Teor	Mín. 99%
		pH (Sol. 5% a 25°C)	5,0 - 9,0
		Insolúveis em $\text{H}_2\text{O}$	Máx. 0,005%
		Iodeto (I)	Máx. 0,002%
		Brometo (Br)	Máx. 0,01%
		Clorato e Nitrato (Como $\text{NO}_3$ )	Máx. 0,003%
		Compostos Nitrogênicos (Como N)	Máx. 0,001%
		Fosfato ( $\text{PO}_4$ )	Máx. 5 ppm
		Sulfato ( $\text{SO}_4$ )	Máx. 0,004%
		Bário (Ba)	Máx. 0,001%
		Ppt Ca, Mg e $\text{R}_2\text{O}_3$	Máx. 0,005%
		Metais Pesados (Como Pb)	Máx. 5 ppm
		Ferro (Fe)	Máx. 2 ppm
		Potássio (K)	Máx. 0,01%

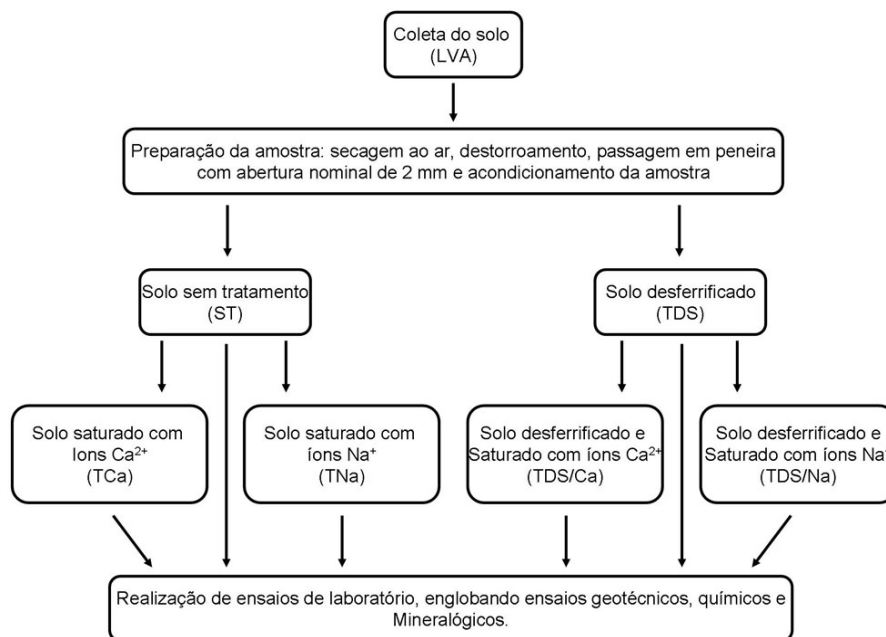
Em especial, optou-se por trabalhar com esses sais pelo fato de os íons sódio e cálcio apresentarem comportamentos opostos, sendo o primeiro dispersante e o segundo floculante.

### 3.2. Metodologia

Trabalhou-se com o LVA sem nenhum tipo de tratamento e após os tratamentos especificados a seguir, adotando-se terminologias específicas para as suas identificações, como segue:

- ST: Latossolo Vermelho-Amarelo sem tratamento;
- TDS: Latossolo Vermelho-Amarelo tratado com ditionito de sódio, ou seja, desferrificado;
- TCa: Latossolo Vermelho-Amarelo tratado com cloreto de cálcio, ou seja, saturado com íons  $\text{Ca}^{2+}$ ;
- TNa: Latossolo Vermelho-Amarelo tratado com cloreto de sódio, ou seja, saturado com íons  $\text{Na}^+$ ;
- TDS/Ca: Latossolo Vermelho-Amarelo tratado com ditionito de sódio e cloreto de cálcio, ou seja, desferrificado e saturado com íons  $\text{Ca}^{2+}$ ; e
- TDS/Na: Latossolo Vermelho-Amarelo tratado com ditionito de sódio e cloreto de sódio, ou seja, desferrificado e saturado com íons  $\text{Na}^+$ .

A Figura 6 apresenta um croqui esquemático do programa de estudo de laboratório, com detalhamento das etapas, ensaios e análises empregadas em cada tratamento.



**Figura 6.** Detalhamento: preparação da amostra do LVA, modificação do solo e programa de ensaios de laboratório.

### **3.2.1. Coleta e preparação da amostra do LVA**

Coletou-se um conjunto de amostras deformadas representativas do LVA, quanto à textura e constituição química e mineralógica, em um talude de corte às margens da rodovia que une as cidades de Viçosa – Paula Cândido, em Minas Gerais, Brasil, as quais foram, em seguida, armazenadas em sacos plásticos com capacidade individual de 50 kg e encaminhadas para o Laboratório de Engenharia Civil (LEC) do DEC. No LEC, as amostras foram secas ao ar, destorroadas, passadas na peneira com abertura nominal de 2 mm e acondicionadas em tambores com capacidade de 200 l, com vistas às suas utilizações nos ensaios de laboratório previstos, podendo-se referir a: (i) ensaios geotécnicos de caracterização, compactação, resistência mecânica, compressibilidade e permeabilidade; (ii) análises químicas; e (iii) análises mineralógicas.

No que se refere à preparação das amostras deformadas para realização dos ensaios geotécnicos, foram obedecidos os procedimentos recomendados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1986a). Quanto à preparação das amostras utilizadas nas análises químicas e mineralógicas, foram seguidos procedimentos específicos que se encontram descritos nos itens apresentados, seqüencialmente, no presente texto.

### **3.2.2. Preparação dos solos modificados**

#### **3.2.2.1. Determinação do teor de ditionito de sódio**

Com vistas à determinação do teor técnico-econômico de ditionito de sódio a ser empregado na modificação do LVA, dividiu-se essa etapa do trabalho em três fases distintas, englobando: (i) estudo teórico, onde se gerou uma porcentagem teórica do redutor químico para promover a extração dos óxidos de ferro; (ii) análise mineralógica, em que se tomou por base esse valor teórico, definindo-se uma faixa de estudo, e variando-se ainda o teor de umidade; (iii) análise geotécnica, onde se estudou a

influência da percentagem de ditionito de sódio e do tempo de descanso da mistura nos parâmetros de plasticidade. Cabe ressaltar que os procedimentos de laboratório aqui empregados foram desenvolvidos de modo que pudessem, com adaptações simples, ser empregados em situações de campo. As fases do estudo são detalhadas, como segue:

- **Fase 1: estudo teórico**

Analisando-se o trabalho de Trindade (2006), constatou-se que no LVA, os óxidos de ferro presentes são, predominantemente, na forma de goethita. Assim, realizou-se uma extração total de óxidos de ferro, de forma a se verificar o seu quantitativo, e em seguida efetuaram-se os devidos cálculos estequiométricos para obtenção do teor teórico de ditionito de sódio a se empregar no LVA para produzir as modificações mineralógicas.

Sabendo-se que o presente solo possui aproximadamente 65% de argila em sua composição granulométrica, e de posse da fórmula química e da equação de redução da goethita, bem como da equação de redução do ditionito de sódio, primeiramente calculou-se o teor de óxidos de ferro presente na fração argila do LVA; em seguida, transformou-se esse valor em um valor referente ao solo como um todo; e, por último, calculou-se o teor de ditionito de sódio a se utilizar. Os dados empregados no estudo foram, como segue:

- Fórmula química da goethita:  $\text{FeOOH}$ ;
- Massa Molecular: 88,85 g;
- Fórmula química do ditionito de sódio:  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ;
- Massa Molecular: 174 g;
- Porcentagem de argila do LVA: 65%;
- Porcentagem de óxidos de ferro em relação à massa de argila: 13,1%;
- Equação de redução do ditionito de sódio:  $4\text{OH}^- + \text{S}_2\text{O}_4^{2-} \rightarrow 2\text{SO}_3^{2-} + 2\text{e}^-$ ;
- Equação de redução da goethita:  $\text{FeOOH} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ .

- **Fase 2: análise mineralógica**

A partir do teor de ditionito de sódio determinado na fase anterior, realizaram-se análises de raios-X nas amostras de solo tratadas com teores crescentes de 0%, 3%, 6%, 9%, 12% e 15% deste reagente, em relação à

massa de solo seco. Esses teores foram escolhidos atribuindo-se uma faixa de trabalho, com dois valores acima e dois abaixo do valor teórico, de modo a se verificar, na prática, como se ocorreram as modificações no LVA com o acréscimo do teor do redutor químico. Variou-se, ainda, o teor de umidade das amostras, nos valores de  $W_{ót}$ ,  $W_{ót}+3\%$  e  $W_{ót}+6\%$ , de modo a se verificar a influência do teor de umidade nas reações. A umidade ótima ( $W_{ót}$ ) refere-se à energia de compactação do ensaio Proctor normal, para o LVA sem tratamento. Cabe ressaltar que para que as reações do ditonito de sódio se desenvolvam, é necessária a presença de água. Mas, em contrapartida, valores muito superiores ao referente à umidade ótima de compactação, tornariam o material incapaz de se trabalhar em condições de campo; assim, limitou-se a 6 % o acréscimo máximo na umidade ótima do LVA.

Os procedimentos de ensaios englobaram o armazenamento das amostras de solo, no quantitativo de 100 g, em sacos plásticos, adição dos percentuais de reagente às mesmas e, em seguida, homogeneização das misturas. Posteriormente, adicionou-se a quantidade de água necessária para levar a mistura à umidade desejada e, novamente, procedeu-se à sua homogeneização. Na seqüência a amostra passou por um período de incubação de 7 dias, onde se ocorreram reações, até se atingir a estabilização. Findo esse período de tempo, retirou-se, aproximadamente, 25 g de cada amostra e separou-se a fração areia da fração silte mais argila, através de peneiramento, em peneira com malha de abertura nominal de 0,05 mm, em meio aquoso.

A solução resultante do peneiramento foi deixada em descanso por um período de 24 h, de modo a permitir que a fração de solo decantasse. Após essa etapa, o líquido sobrenadante foi sifonado, deixando-se sobre o material decantado uma lâmina de água o menos espessa possível, levando-se o conjunto resultante a uma estufa com temperatura em torno de 50 °C. Após secagem das amostras (fração com diâmetro inferior a 0,05 mm), elas foram destorroadas para a confecção de lâminas escavadas, para a realização das análises de raios-X, a fim de se verificar a ocorrência de mudanças mineralógicas com a adição de ditonito de sódio ao LVA.

- **Fase 3: análise geotécnica**

Através dos resultados obtidos na fase anterior, detectou-se que a faixa de teor de umidade estudada não influenciou significativamente o processo de mudança mineralógica, o que levou a se adotar, na fase atual, apenas o teor ótimo de umidade do LVA sem tratamento relativo à energia do ensaio Proctor normal. Outra constatação oriunda da fase anterior foi que mudanças na mineralogia do LVA ocorreram apenas a partir do teor de 6% de ditonito de sódio, bem como que as mesmas perdiam significância após a adição de 12% deste reagente. Assim, nesta fase, trabalhou-se apenas com os teores de 6%, 9% e 12% de ditonito de sódio e com amostras preparadas na umidade ótima previamente referida ( $W_{ót}$ ). Também, estudou-se a influência do tempo decorrido entre a mistura e a realização dos ensaios nos parâmetros de plasticidade das amostras, considerando-se os tempos de 4 h, 8 h, 24 h, 48 h, 72 h e 96 h.

Ao LVA, preparado conforme os procedimentos recomendados pela ABNT (1986a), adicionou-se o ditonito de sódio ao LVA, nos teores supracitados, e homogeneizou-se as misturas. Em seguida, acrescentou-se a massa de água às misturas, até se atingir o  $W_{ót}$  e acondicionou-se o grupo de amostras em sacos plásticos lacrados até o momento em que os tempos de descanso pré-determinados foram alcançados. Posteriormente, realizaram-se os ensaios de limites de liquidez (ABNT, 1984a) e de plasticidade (ABNT, 1984c), buscando-se determinar o teor mínimo de ditonito de sódio que produzisse as maiores modificações nos parâmetros de plasticidade e o menor tempo decorrido entre mistura e realização dos ensaios que indicasse uma estabilização do processo reativo.

### **3.2.2.2. Determinação dos teores dos sais**

Nesta etapa se avaliou o efeito da saturação do complexo de troca do solo estudado com os íons  $Na^+$  e  $Ca^{2+}$ , trabalhando-se com duas amostras de solo, como segue: (i) a primeira, constando, apenas, do solo devidamente seco ao ar, destorroado e passado na peneira com abertura nominal de 2 mm; (ii) a segunda, que, além de receber os mesmos

tratamentos da primeira, passou pelo processo de remoção de óxidos de ferro, conforme se descreveu no item anterior.

Em seguida, as duas amostras de solo previamente preparadas foram submetidas às modificações iônicas. Com relação a essas modificações, adotou-se um procedimento de laboratório que, com adaptações, pode ser empregado em situações de campo.

Foram preparadas amostras de solo tratadas com diferentes teores de sais, obedecendo a: primeiramente, pesaram-se amostras de 250 g de solo seco ao ar, às quais se adicionou quantitativos de 0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, 4% e 8% dos sais NaCl e CaCl<sub>2</sub>; posteriormente, homogeneizou-se cada amostra e adicionou-se às mesmas a massa de água necessária para que atingissem a umidade ótima pré-determinada para o solo em estudo relativa à energia do ensaio Proctor normal. Em seguida, manteve-se o conjunto de amostras em incubação por 7 dias em embalagens plásticas fechadas em câmara úmida, de modo a favorecer a ocorrência de reações de troca iônica.

Findo o período de incubação, as amostras foram secas ao ar e, em seguida, realizaram-se análises químicas para a determinação dos íons presentes nos seus respectivos complexos de troca iônica. De posse dos resultados das análises químicas, foram determinados os seus índices de saturação de sódio e de cálcio, partindo-se da premissa que as doses necessárias dos sais para produzirem os solos modificados eram aquelas capazes de elevarem os índices de saturação do complexo de troca com Na<sup>+</sup> e Ca<sup>2+</sup> a valores superiores a 95%.

### **3.2.3. Análises químicas e eletroquímicas**

A caracterização do complexo sortivo dos solos foi realizada segundo os procedimentos preconizados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1997). Os cátions trocáveis Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> foram extraídos em KCl 1 mol/L e determinados por espectrometria de absorção atômica. O cátion Al<sup>3+</sup>, extraído por KCl 1 mol/L, foi determinado volumetricamente por titulação com NaOH 0,025 mol/L. A acidez potencial

( $H^+ + Al^{3+}$ ) foi determinada via extração com acetato de cálcio 0,5 mol/L a pH 7,0 e posterior titulação com NaOH. Os cátions  $K^+$  e  $Na^+$  foram extraídos por extrator Mehlich-1 e determinados por fotometria de chama. A partir dos resultados destas análises, foi possível determinar: (i) a soma das bases trocáveis (SB):  $K^+ + Na^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}$ ; (ii) a capacidade de troca de cátions (CTC):  $SB + (H^+ + Al^{3+})$ ; (iii) saturação por bases (V%):  $(SB/CTC) \times 100$ .

### 3.2.4. Caracterização mineralógica

A mineralogia do solo foi determinada por meio de difratometria de raios-X, utilizando-se as frações silte mais argila (fração que passa na peneira de abertura 0,05 mm) e argila (fração que passa na peneira de abertura 0,002 mm).

Na montagem correspondente ao material constituído por silte mais argila, foram utilizadas lâminas de vidro com uma pequena cavidade para receber as amostras (lâminas escavadas) com partículas não orientadas. O material foi previamente seco em estufa a uma temperatura de 50 °C e moído em almofariz, com auxílio de uma mão de gral. Em seguida, untou-se o fundo da cavidade da lâmina com cola tenaz diluída em água e distribuiu-se o material uniformemente na mesma, nivelando-a e pressionando-se o material de maneira mais branda possível, de modo a fixá-lo, evitando-se, assim, uma possível orientação.

No que diz respeito ao material constituído pela fração argila, optou-se pela montagem orientada, utilizando-se lâminas de vidro liso. Nesse caso, para se obter uma melhor orientação das partículas, trabalhou-se com o método da pipeta, que consiste em se preparar uma solução de argila, e se pipetar essa solução de modo que seja espalhada uniformemente sobre a lâmina de vidro lisa, e colocada para secar em temperatura ambiente.

Todas as lâminas foram irradiadas no intervalo entre 8° e 50° 2 Theta em um difratômetro de raios-X fabricado pela companhia Rigaku Radiation Shield, com velocidade do goniômetro de 2° 2 Theta/min, utilizando-se radiação proveniente de um tubo de cobalto (Co- $K\alpha$ ) com filtro

de níquel (Ni). A coleta de dados foi realizada a cada  $0,05^\circ$  2 Theta, com o auxílio de um sistema de aquisição de dados.

Foram realizadas análises para a determinação dos percentuais de óxidos de ferro cristalinos e amorfos, com o solo sem tratamento e com o solo tratado com o ditonito de sódio. Para tanto, foram preparadas duas amostras, uma sem tratamento (ST) e uma amostra com tratamento.

A amostra sem tratamento foi exposta ao ar, de modo a se promover a sua secagem. Após mesma ter sido seca ao ar, conduziu-se o processo de separação da sua fração argila das demais frações, para a determinação dos óxidos de ferro presentes e à separação por meio de decantação, sifonamento e secagem em estufa. Após a secagem da fração argila em estufa, o material foi moído em um almofariz com auxílio de uma mão de gral, sendo utilizado para a determinação dos óxidos de ferro cristalinos e amorfos.

Na amostra tratada, preparou-se e uma amostra na umidade ótima de compactação determinada no ensaio Proctor normal, que foi em seguida homogeneizada. Posteriormente, acondicionou-se a amostra em um saco plástico lacrado pelo período de 48 h, determinado previamente na fase (3) do processo de determinação do teor ótimo de ditonito de sódio, de modo a que esta não perdesse umidade e que ocorressem as reações químicas de interesse. A partir desse ponto, obedeceu-se ao conjunto de procedimentos empregados no caso da amostra sem tratamento.

Com as frações argila de cada uma das amostras preparadas, seguiu-se com a determinação dos óxidos de ferro cristalinos, onde pesou-se aproximadamente de 0,2 g a 0,4 g de argila em tubos de centrífuga, e adicionou-se 10 mL de solução de citrato (0,25 mol/L) e 500 mg de ditonito de sódio em pó. Levou-se o conjunto de tubos ao banho-maria (a  $50^\circ\text{C}$ ) por 30 minutos, sendo estes continuamente agitados. Ao fim dos 30 minutos, colocou-se o conjunto de tubos na centrífuga, à velocidade de 2000 rpm, por 10 minutos, transferindo-se o extrato resultante para balões volumétricos de 100 mL. Repetiu-se essa operação por três vezes e em seguida completou-se o volume com água deionizada e tampou-se o balão. Ressalta-se que em cada extração lavou-se a argila com solução de citrato de sódio (0,5 mol/L) e

descartou-se o sobrenadante. Em uma etapa final, determinou-se o teor de ferro por meio de espectrofotometria de absorção atômica.

Para os óxidos de ferro amorfos, procedeu-se da seguinte forma: pesou-se 0,2 g a 0,4 g da argila em tubos de centrifuga completamente opacos. Adicionou-se 10 mL da solução “Reagente Tamm” (oxalato de amônio 0,2 mol/L + ácido oxálico 0,2 mol/L a pH 3,0) e tampou-se o conjunto de tubos imediatamente. Colocou-se o conjunto de tubos em um agitador horizontal, de modo que os tubos ficassem paralelos à direção do movimento, por um período de 2 h. Em seguida, os tubos foram levados à centrifuga por 10 minutos a 2000 rpm, sendo o sobrenadante transferido para o balão volumétrico de 100 mL, o qual permaneceu tampado. Transferiu-se 5 mL do extrato para o tubo de ensaio, adicionou-se 200 mL de água e procedeu-se à leitura por meio de espectrofotometria de absorção atômica.

### **3.2.5. Caracterização geotécnica**

Para o solo em estudo (ST) e para todos os tratamentos (TDS, TCa, TNa, TDS-TCa, e TDS-TNa), realizaram-se ensaios geotécnicos de laboratório, englobando: (i) caracterização; (ii) compactação (iii) triaxiais consolidados isotropicamente drenados; (iv) compressão não-confinada; (v) permeabilidade com carga variável; e (vi) compressão edométrica.

#### **3.2.5.1. Ensaio de caracterização**

Os ensaios de caracterização geotécnica englobaram: granulometria (ABNT, 1984d); peso específico dos grãos (ABNT, 1984b); limite de liquidez (ABNT, 1984a); e limite de plasticidade (ABNT, 1984c).

#### **3.2.5.2. Ensaio de compactação**

Os ensaios de compactação foram realizados segundo recomendações da ABNT (1986b). Os corpos-de-prova foram moldados via

compactação por processo dinâmico, utilizando-se o molde do ensaio de compactação, com 10,00 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura (aproximadamente, 1.000 cm<sup>3</sup> de volume), obedecendo-se às especificações apresentadas na Tabela 4, de acordo com a energia do Proctor normal. Foram determinadas as curvas de compactação do solo no estado natural e após a aplicação dos tratamentos previstos, determinando-se os parâmetros peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) e umidade ótima ( $W_{\acute{o}t}$ ).

**Tabela 4.** Especificações da energia de compactação usada nos ensaios de compactação

Características inerentes à energia de compactação utilizada	Energia de compactação utilizada
Soquete	Pequeno, com massa de 2,5 kg
Número de camadas	3
Número de golpes por camada	26
Energia de compactação (kN.m/m <sup>3</sup> )	590

Cabe ressaltar que realizaram-se os ensaios de compressão não-confinada, condutividade hidráulica, compressão edométrica e triaxial consolidado isotropicamente drenado em corpos-de-prova reproduzidos através dos parâmetros ótimos de compactação e nas mesmas condições de compactação, com as devidas modificações para cada modalidade, adotando-se como padrões de aceitação dos corpos-de-prova durante o processo de moldagem tolerâncias máximas de  $\pm 0,30$  kN/m<sup>3</sup>, para o peso específico aparente seco máximo, e de  $\pm 0,5\%$ , para a umidade ótima.

### 3.2.5.3. Ensaio de compressão não-confinada

Nessa etapa, os ensaios foram conduzidos de acordo com as exigências da ABNT (1992), com corpos-de-prova reproduzidos nos parâmetros ótimos de compactação do Proctor normal, na velocidade de carregamento de 1,25 mm/min. O resultado de cada ensaio foi obtido através do emprego da média dos valores de ruptura de três corpos-de-prova, adotando-se um desvio padrão máximo de  $\pm 10\%$  em torno da média. Nos casos em que o desvio padrão ultrapassou esse limite, procedeu-se à execução de mais três novos corpos-de-prova, para a obtenção da resistência mecânica.

#### **3.2.5.4. Ensaios de condutividade hidráulica**

Na realização dos ensaios para determinação da condutividade hidráulica do solo (ST) e dos solos tratados (TDS, TCa, TNa, TDS-TCa, e TDS-TNa), utilizou-se o ensaio de permeabilidade com carga variável, obedecendo as recomendações da ABNT (2000), com corpos-de-prova moldados nos parâmetros ótimos de compactação, trabalhando com duas repetições, de modo a se obter como resultado final a média desses dois valores.

#### **3.2.5.5. Ensaios de compressão edométrica**

Os parâmetros de compressibilidade do ST e dos seus respectivos tratamentos, TDS, TCa, TNa, TDS-TCa, e TDS-TNa foram determinados via ensaios de compressão edométrica realizados segundo as recomendações da ABNT (1990).

Inicialmente, foram moldados corpos-de-prova nos parâmetros ótimos de compactação ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$  e  $W_{\acute{o}t}$ ) e nas umidades  $W_{\acute{o}t}+2\%$  e  $W_{\acute{o}t}-2\%$ , ou seja, corpos-de-prova nos ramos seco e úmido da curva de compactação, empregando-se a energia Proctor normal. Em seguida, as amostras para a realização dos ensaios edométricos foram obtidas via um processo de cravação de um anel metálico com dimensões de 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura nos corpos-de-prova previamente moldados.

#### **3.2.5.6. Ensaios triaxiais consolidados isotropicamente drenados**

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos ST, TDS, TCa, TNa, TDS-TCa, e TDS-TNa foram determinados via a realização de ensaios triaxiais estáticos consolidados isotropicamente drenados (CID) realizados em corpos-de-prova moldados nos parâmetros ótimos de compactação ( $W_{\acute{o}t}$  e  $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) da energia do ensaio Proctor normal.

Os corpos-de-prova foram compactados por processo dinâmico, em três camadas iguais, no cilindro Proctor. A partir desses corpos-de-prova, foram talhados, com auxílio de um estilete, corpos-de-prova com dimensões

menores (8,0 cm  $\pm$ 0,2 cm de altura por 3,6 cm  $\pm$ 0,1 cm de diâmetro), para realização dos ensaios triaxiais. Para a determinação da envoltória de resistência ao cisalhamento, foram talhados seis corpos-de-prova, reservando-se quatro para a realização dos ensaios triaxiais e dois para reserva, podendo ou não ser utilizados em caso de problemas ocorridos durante a realização dos ensaios.

Os ensaios triaxiais CID foram realizados de acordo com os procedimentos recomendados por Head (1982), com corpos-de-prova submetidos às tensões confinantes de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa. Durante a realização dos ensaios, os corpos-de-prova foram colocados em células triaxiais, para fins de saturação, com exigência de parâmetros B de Skempton superiores a 98%. Em seguida, foram carregados isotropicamente com as devidas tensões de confinamento, em condições drenadas. Ainda em condições drenadas e com as tensões de confinamento atuantes, os corpos-de-prova foram levados à ruptura através da aplicação axial de uma tensão desviadora a uma velocidade de aplicação de 0,15 mm/min. Os ensaios foram conduzidos até que cada corpo-de-prova atingisse a ruptura ou até que a deformação axial atingisse um valor da ordem de 20 %. No decorrer dos ensaios, os deslocamentos axiais foram medidos, empregando-se um relógio comparador instalado no exterior da câmara triaxial, e a força vertical aplicada por meio de um pistão no topo do corpo-de-prova foi registrada, por meio de um segundo relógio comparador instalado no interior de um anel de carga com capacidade de 20 kN.

## 4. Resultados

---

### 4.1. Preparação dos solos modificados

#### 4.1.1. Determinação do teor de ditionito de sódio

Obedeceu-se à seguinte seqüência para a determinação do o teor de ditionito de sódio:

1 mol de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4 \rightarrow 2\text{mol de FeOOH}$

13,1% de FeOOH x 65% de argila  $\rightarrow$  8,51% de FeOOH em relação ao solo

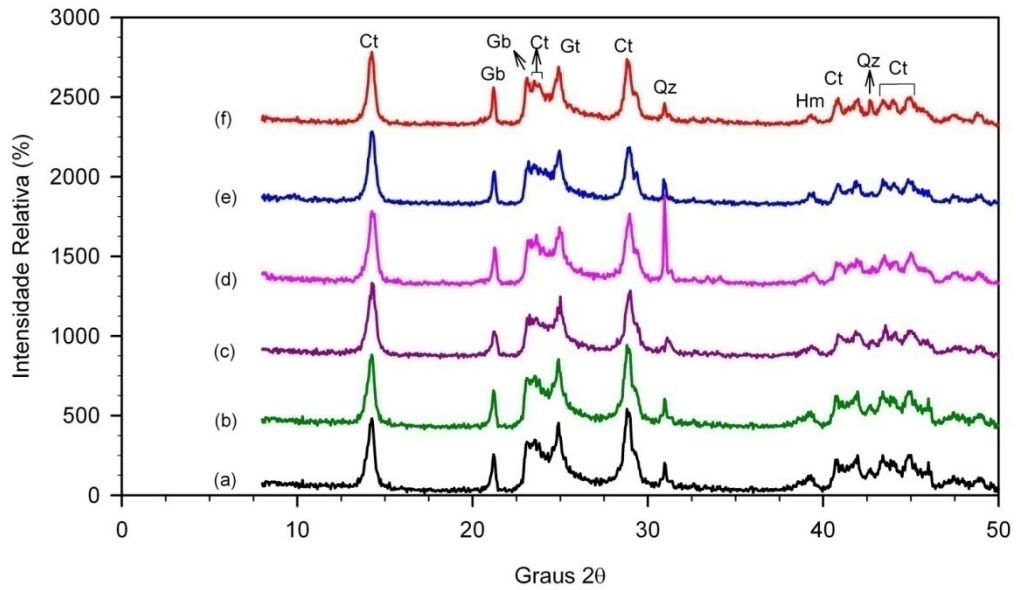
1 mol de ditionito de sódio (174g)  $\rightarrow$  2 mols de FeOOH ((88,85x2)g)

x(g) de ditionito de sódio  $\rightarrow$  8,51(g) de FeOOH

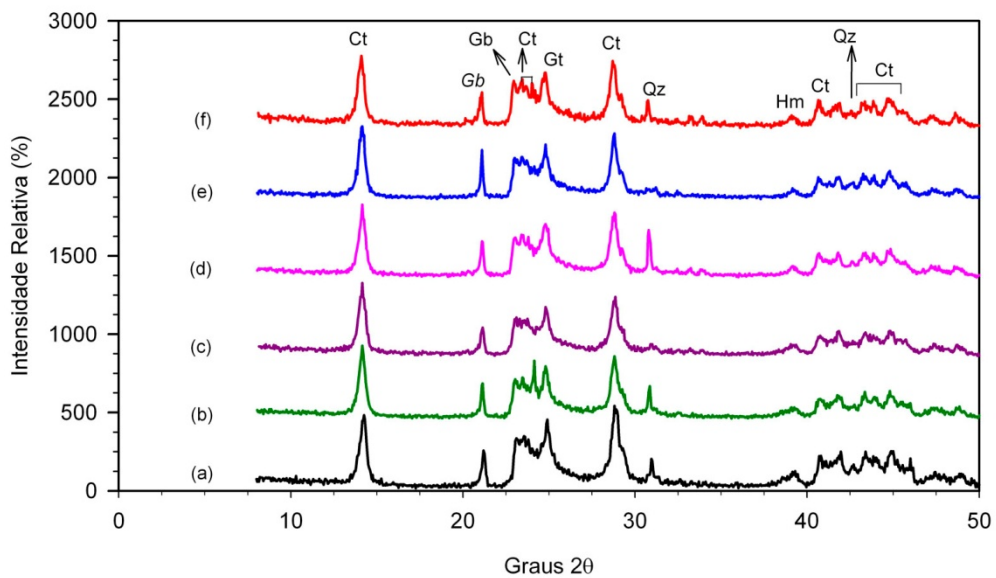
x = 8,33g  $\rightarrow$  9% de ditionito de sódio em relação a massa de solo

Através desses cálculos, chegou-se a um teor teórico necessário de 9% de ditionito de sódio para promover a extração dos óxidos de ferro presentes no solo ST.

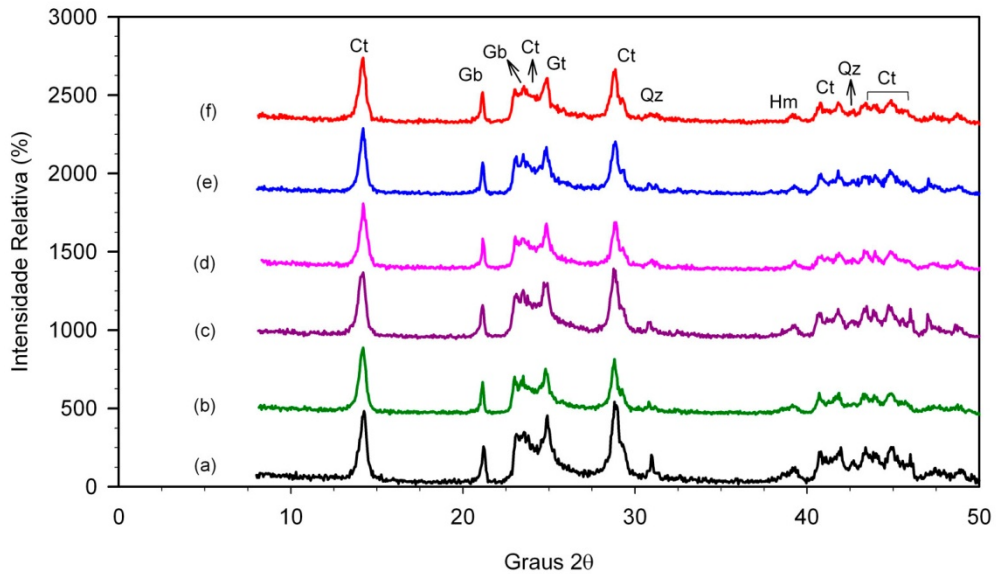
Com o valor teórico obtido, passou-se para a fase seguinte, onde foram realizadas as análises mineralógicas, empregando-se os teores de ditionito de sódio de 0%, 3%, 6%, 9%, 12% e 15% em relação à massa de solo seco, para a determinação do teor mínimo de reagente que produzisse variações significativas na mineralogia do LVA. Em busca da confirmação da ocorrência dessas mudanças mineralógicas, foram realizados ensaios de raios-X, trabalhando-se com três amostras de solo preparadas nos teores de reagente referidos e, respectivamente, nas umidades  $W_{ót}$ ,  $W_{ót+3\%}$  e  $W_{ót+6\%}$ , na busca de se analisar, também, a influência do teor de umidade no processo de extração de óxidos de ferro com o uso de ditionito de sódio. As Figuras 7, 8 e 9 apresentam os difratogramas dos ensaios de raios-X realizados.



**Figura 7.** Difratogramas de raios-X da fração silte mais argila do LVA e do LVA tratado com diferentes teores de ditionito de sódio, na umidade ótima: (a) sem tratamento; (b) tratamento com 3%; (c) tratamento com 6%; (d) tratamento com 9%; (e) tratamento com 12%; e (f) tratamento com 15%.



**Figura 8.** Difratogramas de raios-X da fração silte mais argila do LVA e do LVA tratado com diferentes teores de ditionito de sódio, na umidade ótima mais 3%: (a) sem tratamento; (b) tratamento com 3%; (c) tratamento com 6%; (d) tratamento com 9%; (e) tratamento com 12%; e (f) tratamento com 15%.



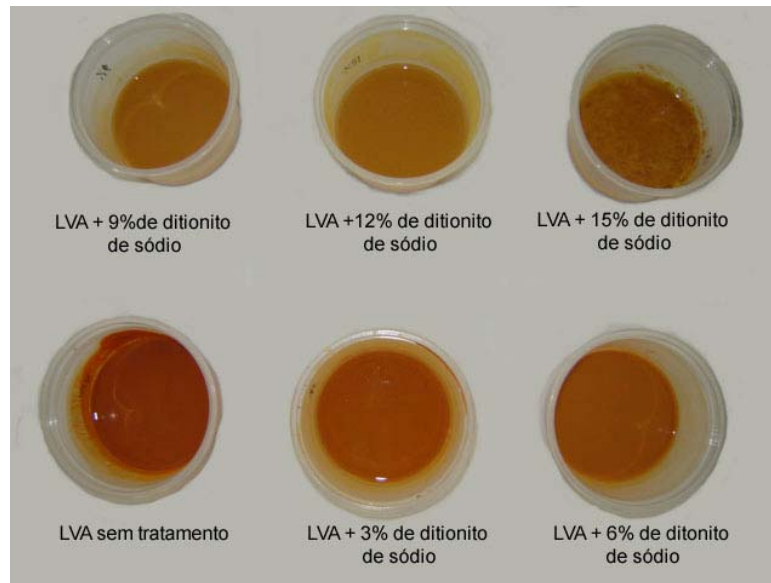
**Figura 9.** Difratoformas de raios-X da fração silte mais argila do LVA e do LVA tratado com diferentes teores de ditionito de sódio, na umidade ótima mais 6%: (a) sem tratamento; (b) tratamento com 3%; (c) tratamento com 6%; (d) tratamento com 9%; (e) tratamento com 12%; e (f) tratamento com 15%.

Observando os resultados referentes às análises de raios-X apresentadas nas Figuras 7, 8 e 9, nota-se que, para um mesmo teor de umidade, não ocorreram mudanças mineralógicas significativas no LVA após tratamento com diversos teores de ditionito de sódio, bem como não se detectou a ocorrência de mudanças significativas, para fins práticos, quando se variou o teor de umidade.

Apesar de não terem sido acusadas nos ensaios de raios-X, acredita-se que os tratamentos empregados produziram mudanças mineralógicas no solo, como se constata visualmente a partir da tonalidade das amostras apresentadas na Figura 10. Como os óxidos de ferro possuem alto poder pigmentante, assim uma descoloração do solo implica em uma mudança na constituição mineralógica. Ainda referindo-se a Figura 10, nota-se que o aumento do teor do redutor químico, tornou mais clara a amostra do LVA, o que caracteriza mudanças na constituição mineralógica, quando se compara a amostra sem tratamento com aquelas tratadas com os teores de 6% a 15% de ditionito de sódio.

Cabe ressaltar que na Figura 10, o teor referente a 15% de ditionito de sódio apresenta-se uma coloração mais escura que para o teor de 12%,

devido ao fato da presença de uma capa ferruginosa na superfície da lâmina d'água.

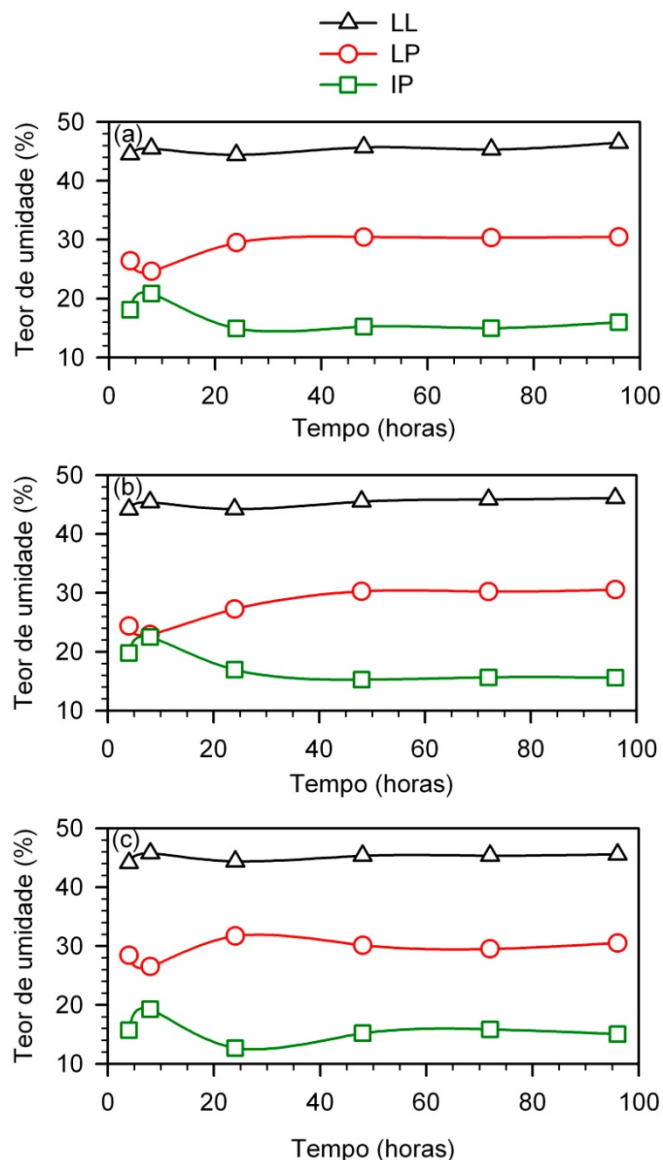


**Figura 10.** Modificações visuais produzidas na coloração do LVA, após a adição de ditionito de sódio, nos teores de 3%, 6%, 9%, 12% e 15%.

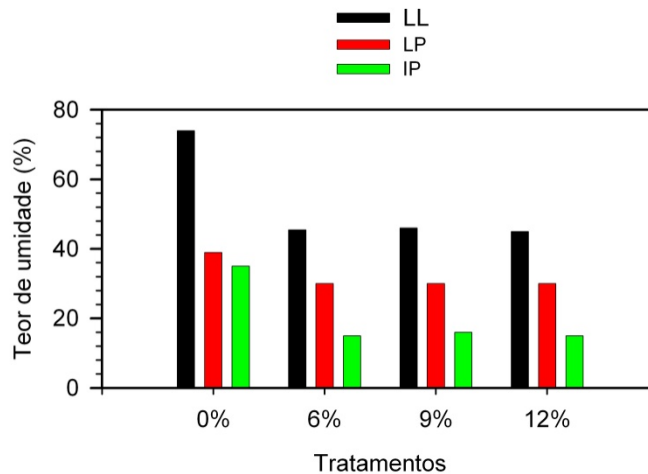
Assim, procedeu-se a última etapa deste estudo, que foi dirigida à realização dos ensaios de caracterização geotécnica, especificamente às determinações de LL, LP e, conseqüentemente, de IP, para fins de determinação do teor ótimo de ditionito de sódio para a extração de óxidos de ferro do LVA, considerando-se os teores de 6%, 9% e 12% de ditionito de sódio e incorporando-se ao estudo a análise da influência do período decorrido entre a adição do reagente ao solo e a posterior realização dos ensaios geotécnicos de interesse. Neste estudo trabalhou-se com misturas preparadas na umidade ótima ( $W_{ót}$ ) determinada em ensaios de compactação realizados no LVA na energia do Proctor normal, considerando-se os períodos entre mistura e ensaio de 4, 8, 24, 48, 72 e 96 horas.

Os resultados desse estudo estão apresentados nas Figuras 11 e 12, de onde se infere a ocorrência de um teor ótimo de ditionito de sódio de 6%, uma vez que não se observou variações significativas entres os teores de 6%, 9% e 12%; assim por questão técnica econômica optou-se por trabalhar com o menor desses três teores. A partir dos resultados apresentados na Figura 11, definiu-se o período mínimo decorrido entre mistura e compactação como sendo de 48 horas, ou seja, a partir desse

ponto ocorreu uma estabilização dos índices de plasticidade, caracterizando-se como o tempo mínimo necessário para o desenvolvimento das reações entre o LVA e o ditonito de sódio. Ainda com relação à Figura 11, pra fins práticos, nota-se que ocorreu uma variação significativa nos valores de limites de Atterberg, aproximadamente, nas primeiras 24 h, bem como somente após 48 h, para qualquer um dos três teores estudados, é que tais parâmetros se estabilizaram, indicando o fim da ocorrência de reações entre o redutor e o latossolo.



**Figura 11.** Resultados dos ensaios de limites de Atterberg (LL e LP) e do índice de plasticidade (IP) do LVA, para os teores de: (a) 6%, (b) 9% e (c) 12% de ditonito de sódio, para os tempos entre mistura e realização dos ensaios de 4 h, 8 h, 24 h, 48 h, 72 h e 96 h.

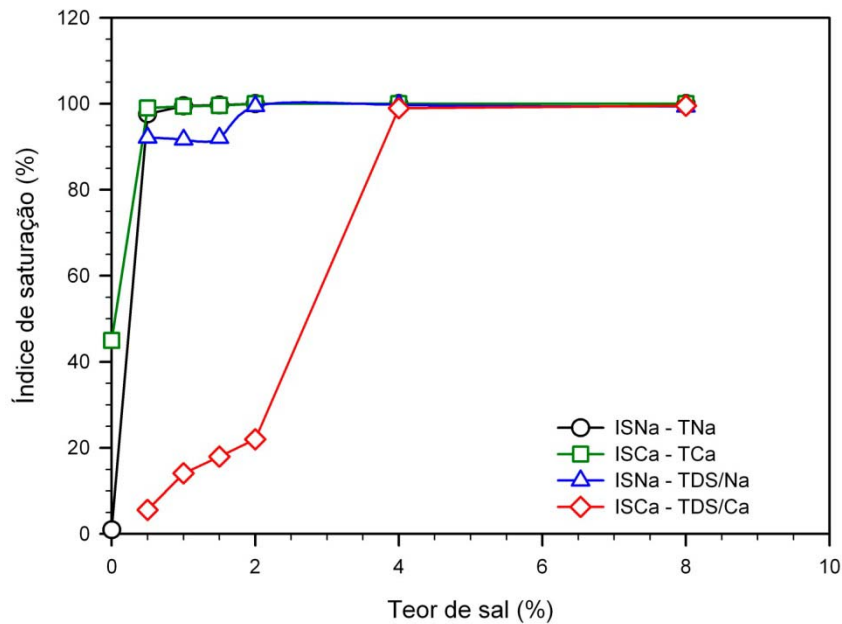


**Figura 12.** Quadro resumo dos resultados dos ensaios de limites de Atterberg (LL e LP) e do índice de plasticidade (IP) do LVA, para os teores de ditonito de sódio de 6%, 9% e 12%, para o tempo entre mistura e realização dos ensaios de 48 h.

Analisando-se os resultados apresentados na Figura 12, observa-se que os valores dos limites de Atterberg, para fins práticos de engenharia, não variaram de forma significativa com os acréscimos nos teores do redutor químico. Nota-se que a adição de 6% do redutor ao solo foi responsável por mudanças significativas no seu LL e no seu IP, respectivamente, com quedas aproximadas de 38% e 57%, observando-se pouca influência dos teores maiores empregados nestes parâmetros. Assim, essa constatação levou a se empregar o percentual de 6% de ditonito de sódio para a realização dos demais ensaios geotécnicos do solo modificado.

#### 4.1.2. Determinação do teor de sal para cada tratamento

A Figura 13 apresenta os índices de saturação dos sais do ST e do TDS tratado com os sais NaCl e CaCl<sub>2</sub>, nos teores de 0,5%, 1%, 2%, 4% e 8% em relação a massa de solo seco.



**Figura 13.** Índices de saturação dos sais NaCl e CaCl<sub>2</sub> para as amostras de ST nos teores crescentes de 0,5%, 1%, 2%, 4% e 8% em relação a massa de solo seco.

Através dos dados apresentados na Figura 13, foi possível determinar o teor mínimo de sal capaz de elevar os índices de saturação do complexo de troca do solo com Ca<sup>2+</sup> e Na<sup>+</sup> a valores acima de 95%. Para o TNa, juntamente com o TCa, teores de 0,5% mostraram-se suficientes para se alcançar esse índice; mas, devido às situações de campo, especialmente considerando as condições de homogeneização da mistura, optou-se por se trabalhar com o teor de 1% para ambas as situações. No caso do TDS/Na, o teor mínimo necessário para se alcançar valores superiores a 95% de índice de saturação foi de 2%, ao passo que para o TDS/Ca só foi possível alcançar valores acima de 95% com um teor da ordem de 4%. Portanto, esses valores mínimos necessários foram os empregados na preparação das amostras para a realização dos ensaios geotécnicos.

Segundo Trindade (2006), o LVA aqui estudado apresenta uma CTC da ordem de 2,09 cmol<sub>e</sub>/kg, o que confirma os baixos teores de sais NaCl e CaCl<sub>2</sub> necessários para promoverem a saturação do seu complexo de troca a valores superiores a 95%, como é o caso do TNa e do TCa. Ao passo que, para o TDS/Na e o TDS/Ca, essas amostras sofreram um processo de mudança mineralógica pela ação de ditionito de sódio, via uma remoção de óxidos de ferro. Assim, o agente redutor aumentou a concentração de sódio no solo, o que aumentou a CTC e, conseqüentemente, a necessidade de um

maior teor de íons  $\text{Na}^+$  para promoverem a saturação do mesmo. No caso da saturação da amostra que passou pelo processo de mudanças mineralógicas, seria necessário um teor de íons  $\text{Ca}^{2+}$  maior, para assim ocorrer o processo de troca iônica, deslocando-se os íons presentes no complexo de troca.

## 4.2. Caracterização química

A Tabela 5 mostra os resultados da caracterização química do ST e dos solos gerados pelos demais tratamentos. Os valores de pH foram medidos em água, na proporção volumétrica de 1:2,5.

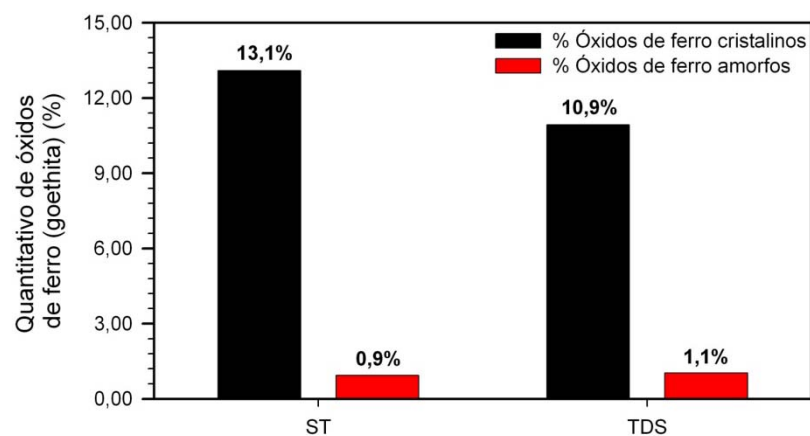
**Tabela 5.** Propriedades químicas do LVA-ST e demais tratamentos

Características do solo		Amostras do LVA e seus tratamentos						
		ST	TDS	TCa	TNa	TDS/Ca	TDS/Na	
Química	pH $\text{H}_2\text{O}$	-	6,1	3,15	5,24	5,26	5,40	5,35
	$\text{K}^+$	cmol <sub>e</sub> /kg	0,05	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02
	$\text{Na}^+$	cmol <sub>e</sub> /kg	0,02	80,53	0,05	17,83	0,38	59,35
	$\text{Ca}^{2+}$	cmol <sub>e</sub> /kg	0,94	0,16	11,12	0,02	41,19	0,24
	$\text{Mg}^{2+}$	cmol <sub>e</sub> /kg	0,09	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03
	$\text{Al}^{3+}$	cmol <sub>e</sub> /kg	0,00	18,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$	cmol <sub>e</sub> /kg	0,99	34,45	1,16	1,51	1,27	1,97
	SB	cmol <sub>e</sub> /kg	1,10	81,57	11,19	18,07	41,63	52,01
	CTC	cmol <sub>e</sub> /kg	2,09	99,57	11,19	18,07	41,63	52,01
	V %	%	52,6	70,3	90,6	92,3	97,4	96,3

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 5, os tratamentos conferidos ao LVA provocaram reduções no pH do solo sem tratamento, ou seja, tornando-o mais ácido, sendo este efeito mais pronunciado para o TDS, onde o pH atingiu o valor de 3,15. Observa-se que os valores de capacidade de troca catiônica dos solos ST, TCa e TNa foram relativamente baixos, praticamente se enquadrando na faixa de 3 a 15 cmol<sub>e</sub>/kg, o que é típico de materiais caulínicos com a presença de óxidos de ferro e de alumínio, como é o caso do latossolo em estudo, enquanto que para os solos TDS, TDS/Ca e TDS/Na este parâmetro atingiu valores significativamente elevados, superiores a 41 cmol<sub>e</sub>/kg. Nota-se que o ST foi o solo que apresentou menor índice de saturação de bases (V), com

52,6% e os restantes exibiram valores na faixa de 70% a 98%. Observou-se que a acidez potencial ( $H^+ + Al^{3+}$ ), coerentemente, apresentou comportamento inverso ao do pH, partindo-se de 0,99 cmol<sub>e</sub>/kg, para a amostra do ST, e atingindo-se 34,45 cmol<sub>e</sub>/kg, para o TDS.

A Figura 14 apresenta os quantitativos de óxidos de ferro (goethita) da fração argila em duas formas distintas, a forma cristalina e a forma amorfa presentes no ST e no TDS. Em observação à mesma, vê-se que ocorreu uma redução significativa na percentagem de óxidos de ferro na forma cristalina, com variação pequena na forma amorfa. Com o redutor químico atuando nas partículas do LVA, esperava-se que houvesse a tendência de que a diminuição da parcela cristalina pudesse ser detectada como crescimento na parcela amorfa, o que não ocorreu no presente caso, sendo este um tópico aberto às discussões.



**Figura 14.** Quantitativo de óxido de ferro (goethita) nas formas cristalinas e amorfas presente na fração argila do ST e TDS.

A Figura 15 mostra os difratogramas de raios-X da fração argila para os solos ST e TDS, com as respectivas identificações dos respectivos minerais neles presentes.

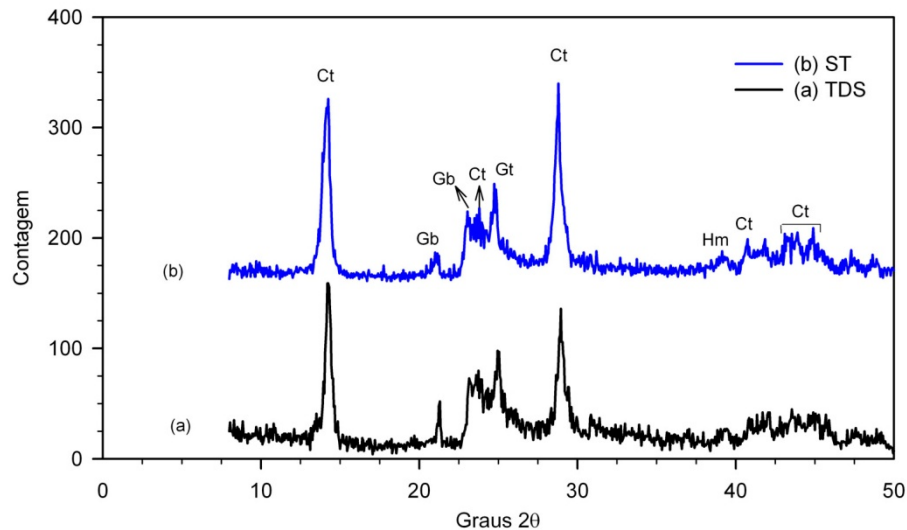


Figura 15. Difratogramas de raios-X da fração argila dos solos TDS (a) e ST (b).

### 4.3. Caracterização geotécnica

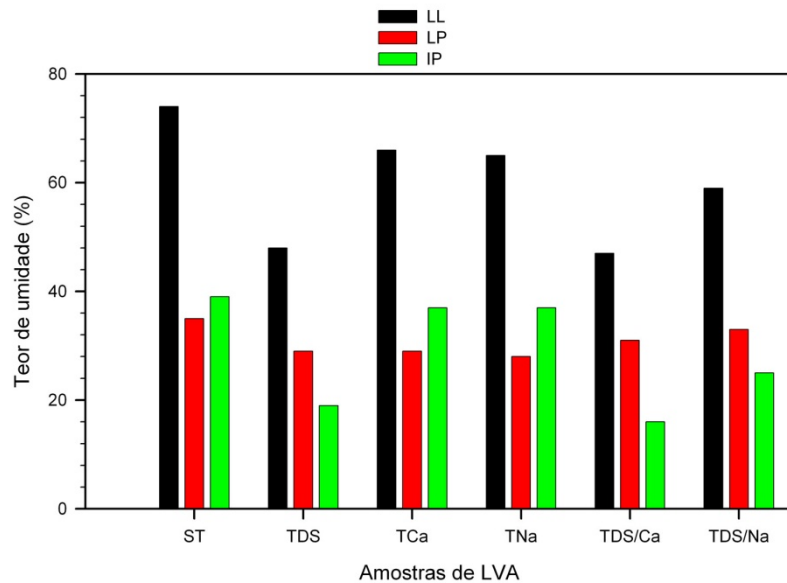
#### 4.3.1. Ensaios de caracterização

A Tabela 6 apresenta os parâmetros de plasticidade, peso específico dos grãos e granulometria, e na Figura 16, ilustram-se as mudanças ocorridas na plasticidade dos solos estudados.

Tabela 6. Resumo dos dados de caracterização geotécnica

Tratamento	Limites de Atterberg			$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	Granulometria		
	LL(%)	LP(%)	IP(%)		Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
ST	74	35	39	26,82	20	15	65
TDS	48	29	19	26,91	20	24	56
TCa	66	29	37	26,80	22	25	53
TNa	65	28	37	26,82	21	14	65
TDS/Ca	47	31	16	26,74	-	-	-
TDS/Na	59	33	25	26,92	21	32	47

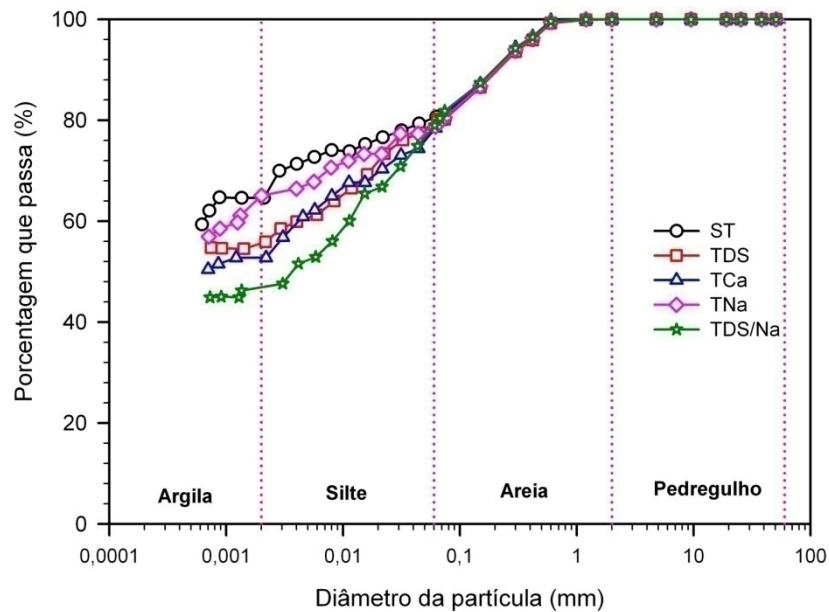
Na Tabela 6, observa-se que, geralmente, as frações granulométricas do LVA não se modificaram significativamente. Devido a problemas com o agente dispersor (hexametáfosfato), não foi possível a obtenção das faixas granulométricas para o solo TDS/Ca.



**Figura 16.** Parâmetros de plasticidade, LL, LP e IP do solo e do solo após os tratamentos.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 6 e na Figura 16, nota-se que os tratamentos aplicados ao LVA produziram reduções nos valores de LL e LP e, conseqüentemente, no IP. Possivelmente, pode-se associar as quedas observadas nos parâmetros LL, LP a aumentos na espessura da dupla camada difusa das partículas do solo. Observa-se que a adição de ditionito de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) e dos sais  $\text{NaCl}$  e  $\text{CaCl}_2$  favoreceu o aumento da concentração de íons sódio e cálcio respectivamente no meio, provavelmente, levando à ocorrência de aumentos na dupla camada difusa e ao fenômeno de dispersão de partículas. Já para os pesos específicos dos sólidos, observa-se que não houve uma variação significativa na sua ordem de grandeza.

A Figura 17 mostra as curvas granulométricas dos solos ST, TDS, TCa, TNa, e TDS/Na, com exceção do tratamento TDS/Ca, uma vez que não foi possível a obtenção das faixas granulométricas, devido a problemas com o agente dispersor (hexametáfosfato). Analisando-se os resultados apresentados nessa Figura, observa-se que os tratamentos conferidos ao LVA produziram mudanças pequenas nas frações mais finas do solo (silte e argila), com exceção do TDS/Na, em que a fração argila sofreu redução de 65% (ST) para 47% (TDS/Na) e a fração silte apresentou aumento de 15% (ST) para 32% (TDS/Na).



**Figura 17.** Curvas granulométricas dos seguintes solos: ST, TDS, TCa, TNa e TDS/Na.

A Tabela 7 apresenta a nova classificação do LVA e do LVA após os tratamentos, segundo os sistemas de classificação TRB e USC. Devido a não se ter dados de granulometria para o TDS/Ca, não se apresentou a sua nova classificação. Observa-se que pelo sistema USC de classificação, nos tratamentos em que se empregou o ditonito de sódio, o solo passou de um material de alta compressibilidade para um de baixa compressibilidade; ao passo que não houve mudança brusca nas classificações pelo sistema TRB de classificação.

**Tabela 7.** Classificação USC e TRB para os solos modificados

Tratamento	Sistema de Classificação	
	USC	TRB
ST	CH ou OH e MH	A-7-5
TDS	ML	A-7-6
TCa	CH	A-7-6
TNa	CH	A-7-6
TDS/Ca	ML	-
TDS/Na	OH e ML	A-7-5

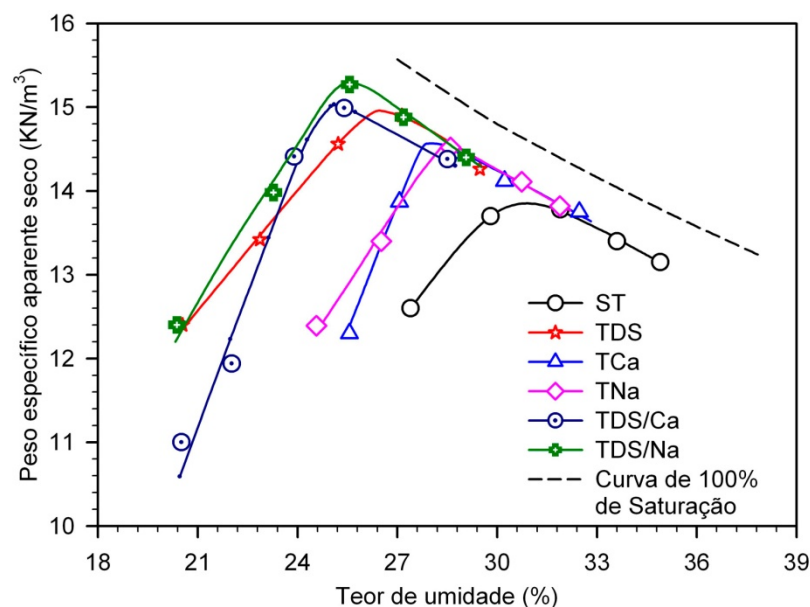
### 4.3.2. Ensaio de compactação

Na Tabela 8, mostram-se os valores dos parâmetros ótimos de compactação, índices de vazios, peso específico dos sólidos e grau de

saturação, bem como na Figura 18 apresentam-se as curvas de compactação do solo e dos seus tratamentos.

**Tabela 8.** Resumo dos parâmetros ótimos de compactação dos tratamentos

Tratamento	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$W_{ót}$ (%)	$e$	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$S_r$ (%)
ST	13,85	30,78	0,94	26,82	89,0
TDS	14,96	26,39	0,80	26,91	90,0
TCa	14,57	28,03	0,84	26,80	90,3
TNa	14,53	28,36	0,85	26,82	90,7
TDS/Ca	15,06	24,83	0,78	26,74	86,0
TDS/Na	15,20	25,15	0,77	26,92	89,0



**Figura 18.** Curvas de compactação do LVA, LVA-TDS, LVA-TCa, LVA-TNa, LVA-TDS-Ca (6% de ditonito de sódio) e LVA-TDS-Na (6% de ditonito de sódio).

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 8 e na Figura 18, são notórias as modificações produzidas nos parâmetros ótimos de compactação do solo em estudo, para todos os tratamentos estudados. Tomando-se como referência o ST, todos os demais tratamentos produziram acréscimos no peso específico aparente seco máximo e decréscimos na umidade ótima. Possivelmente, podem-se associar as variações ocorridas nos parâmetros ótimos de compactação à expansão na espessura da dupla camada difusa das partículas do solo, devido à adição de ditonito de sódio, que favoreceu o aumento da concentração de íons sódio no meio, levando à ocorrência do fenômeno de dispersão de partículas. Sabe-se que em estruturas dispersas, os efeitos da compactação são mais efetivos, o que

levou a uma movimentação da curva de compactação do solo tratado para cima e para a esquerda, à semelhança do que ocorre quando se aumenta a energia de compactação durante a compactação de um mesmo solo, como descreve Lambe (1958).

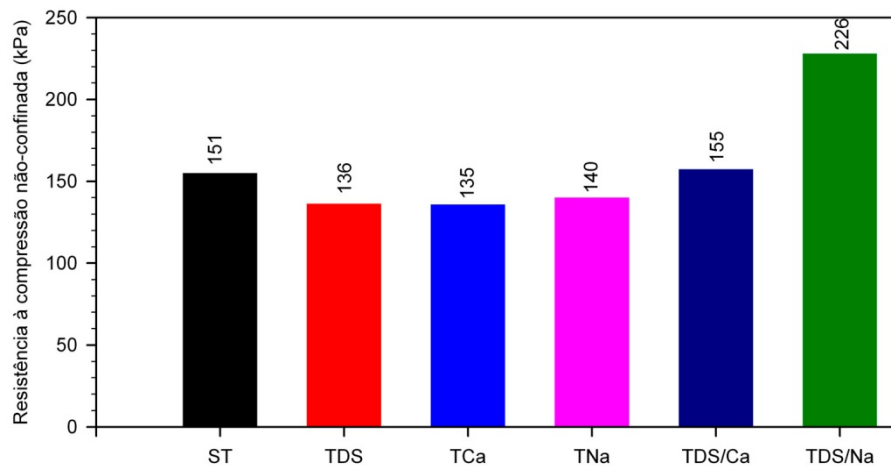
De forma semelhante para os demais tratamentos, acredita-se que as mudanças ocorridas para cada um deles estejam diretamente relacionadas com a espessura da dupla camada difusa. Cada um dos tratamentos aumentou a concentração de íons na solução de solo, seja ele  $\text{Na}^+$  ou  $\text{Ca}^{2+}$ , o que, considerando que os demais fatores que influenciam na espessura da dupla camada difusa permanecessem constantes, provocaria aumento na espessura da dupla camada difusa e, conseqüentemente, fenômenos de dispersão, favorecendo, assim, o processo de compactação dos solos.

Vale destacar que em um solo com fração argila significativa, a presença de óxidos de ferro no estado cristalino garante a existência de uma estrutura mais flokulada, bem como que a adição de ditionito de sódio ao mesmo pode promover quebras na sua matriz cristalina, promovendo mudanças estruturais, com um caminhamento para uma estrutura dispersa, favorecendo, assim, o processo de compactação.

Analisando-se, especificamente, os resultados apresentados na Tabela 8, observa-se que os tratamentos conferidos ao LVA, promoveram ganhos expressivos de  $\gamma_{\text{dmax}}$ , passando de  $13,85 \text{ kN/m}^3$  (ST) para  $15,20 \text{ kN/m}^3$  (TDS/Na), ou seja da ordem de 9,7%; bem como um decréscimo nos valores de  $W_{\text{ót}}$ , mudando de 30,78% (ST) para 25,15% (TDS/Ca), alcançando queda de 19,3%. Geralmente, se associa às mudanças dessas magnitudes nos parâmetros ótimos de compactação a ocorrência de melhorias significativas no comportamento de engenharia dos solos, em termos de resistência ao cisalhamento, permeabilidade e compressibilidade, que poderão ser confirmadas ou não através dos resultados de ensaios geotécnicos específicos para estas finalidades, como destacam Trindade et al. (2008).

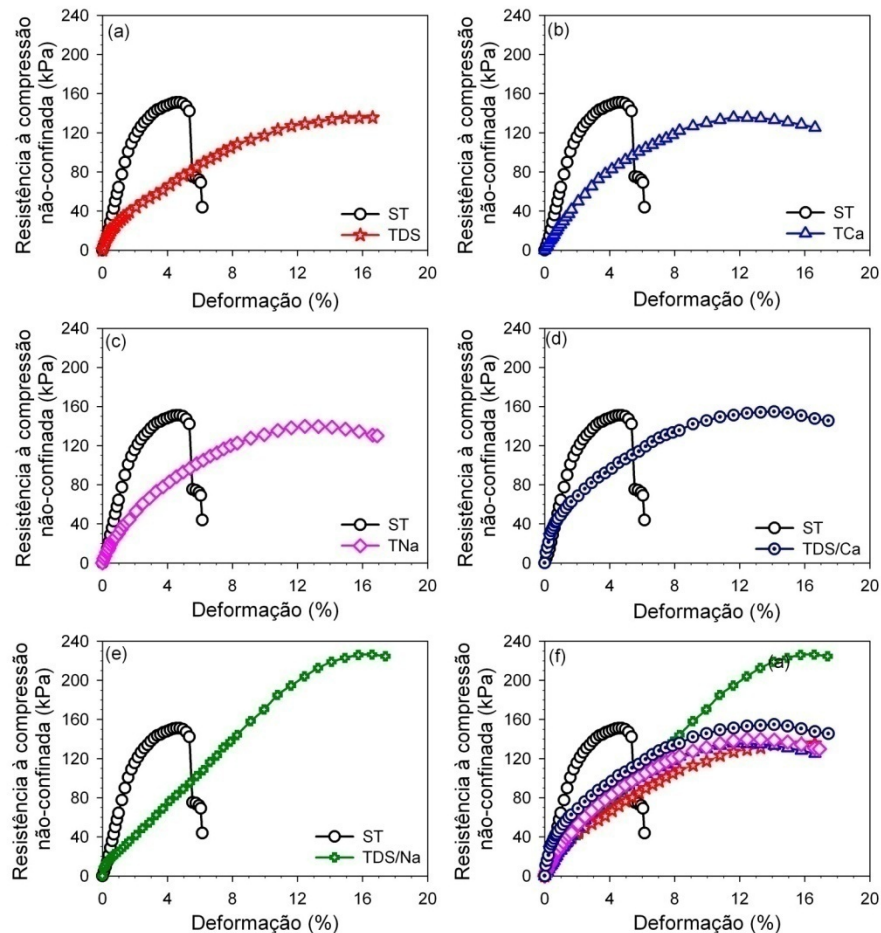
### 4.3.3. Ensaio de compressão não confinada

A Figura 19 apresenta os valores de ruptura para cada tratamento, sendo eles: ST, TDS, TCa, TNa, TDS/Ca e TDS/Na referentes aos ensaios de compressão não-confinada, assim como a Figura 20 apresenta todas as curvas de ruptura para todos os tratamentos, sendo que os cinco primeiros gráficos mostram a curva de ruptura para o solo ST e de cada um dos tratamentos a ele conferidos.



**Figura 19.** Resultado dos ensaios de compressão não confinada do LVA e deste após os tratamentos.

Na Figura 19, para todos os tratamentos conferidos ao LVA, observa-se que boa parte resultou em uma redução de resistência à compressão não confinada, exceto para o tratamento TDS/Ca, em que se obteve um valor de resistência semelhante ao ST, e para o TDS/Na, onde se obteve um ganho de resistência mecânica em relação ao ST da ordem de 50%. Certamente, perdas ou ganhos de resistência estão associados às mudanças estruturais produzidas pelos tratamentos empregados. Como se observa nos resultados dos ensaios de compactação, a adição do ditionito de sódio e dos sais NaCl e CaCl<sub>2</sub> provocou a ocorrência de fenômenos de dispersão no LVA, pelo aumento da espessura da dupla camada difusa, o que, se por um lado favoreceu o processo de compactação, o que foi demonstrado pelos aumentos no parâmetro  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  e reduções no parâmetro  $W_{\acute{o}t}$ , por outro pode ter produzido arranjos estruturais de partículas na forma dispersa que geraram comportamentos de natureza dúctil ou plástica, que se refletiram em ganhos e perdas de resistência mecânica.



**Figura 20.** Curvas de ruptura do solo ST com cada um dos tratamentos: (a) TDS, (b) TCa, (c) TNa, (d) TDS/Ca e (e) TDS/Na; e de todas as curvas juntas (f).

Através da Figura 20, observa-se, com maior clareza, que o solo ST apresentou comportamento de engenharia mais frágil, ao passo que todos os demais tratamentos (TDS, TCa, TNa, TDS/Ca e TDS/Na) mostraram comportamentos mais dúcteis, com suas curvas de ruptura caracterizando-se pela ocorrência de curto, ou quase nulo, regime elástico de deformação, seguido por longo regime plástico, levando à ruptura por deformação excessiva.

#### 4.3.4. Ensaio de condutividade hidráulica

A Tabela 9 mostra os dados referentes aos ensaios de condutividade hidráulica ou permeabilidade realizados com os solos analisados.

**Tabela 9.** Resultado dos ensaios de condutividade hidráulica

Tratamento	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$W_{ót}$ (%)	N	E	k(cm/s x 10 <sup>-7</sup> )
ST	26,82	13,87	30,53	0,49	0,93	9,52
TDS	26,91	14,93	26,21	0,48	0,80	6,27
TCa	26,80	14,49	28,23	0,46	0,85	7,18
TNa	26,82	14,53	28,11	0,46	0,85	3,76
TDS/Ca	26,74	15,06	24,89	0,44	0,79	1,82
TDS/Na	26,92	15,20	25,15	0,44	0,77	1,80

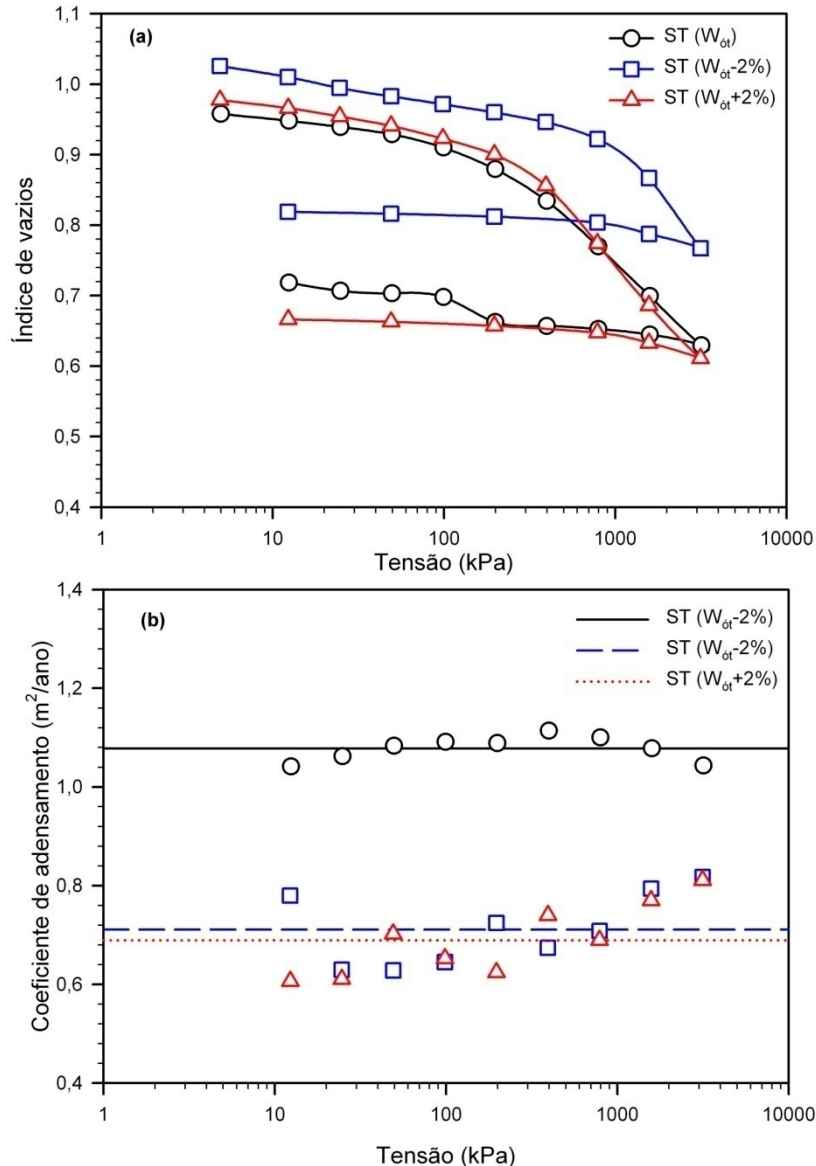
Comparando-se os valores de peso específico aparente seco, índice de vazios e coeficiente de condutividade hidráulica (k) apresentados na Tabela 9, nota-se que, em linhas gerais, este último parâmetro decresceu à medida que o primeiro aumentou e o segundo diminuiu, como era de se esperar. Destaca-se que as reduções mais significativas nos coeficientes de condutividade hidráulica ocorreram para os tratamentos TDS/Ca e TDS/Na, onde elas se mostraram da ordem de 5 vezes, passando de 9,52 E-7 para 1,80 E-7. Pode-se associar essas reduções à produção de estruturas mais dispersas, em concordância com os resultados dos ensaios de compactação já apresentados.

#### 4.3.5. Ensaio de compressão edométrica

As Figuras 21 a 26 apresentam os resultados dos ensaios de compressão edométrica realizados nos solos em estudo, empregando-se corpos-de-prova compactados nos parâmetros ótimos de compactação e nos teores  $W_{ót} \pm 2\%$ , isto é em pontos situados nos ramos seco e úmido das respectivas curvas de compactação. Na parte superior dessas figuras, apresentam-se as curvas de tensão versus índices de vazios nas fases de carregamento e descarregamento, para os teores de umidade  $W_{ót}$  e  $W_{ót} \pm 2\%$ , bem como na parte inferior, os coeficientes de adensamento calculados em cada estágio de carregamento pelo método de Taylor.

Na Teoria do Adensamento Unidirecional (PINTO, 2002), admite-se que as propriedades do solo não variam durante o processo de consolidação, o que se reflete na adoção de um valor constante para o coeficiente de adensamento, para fins práticos. Entretanto, sabe-se que

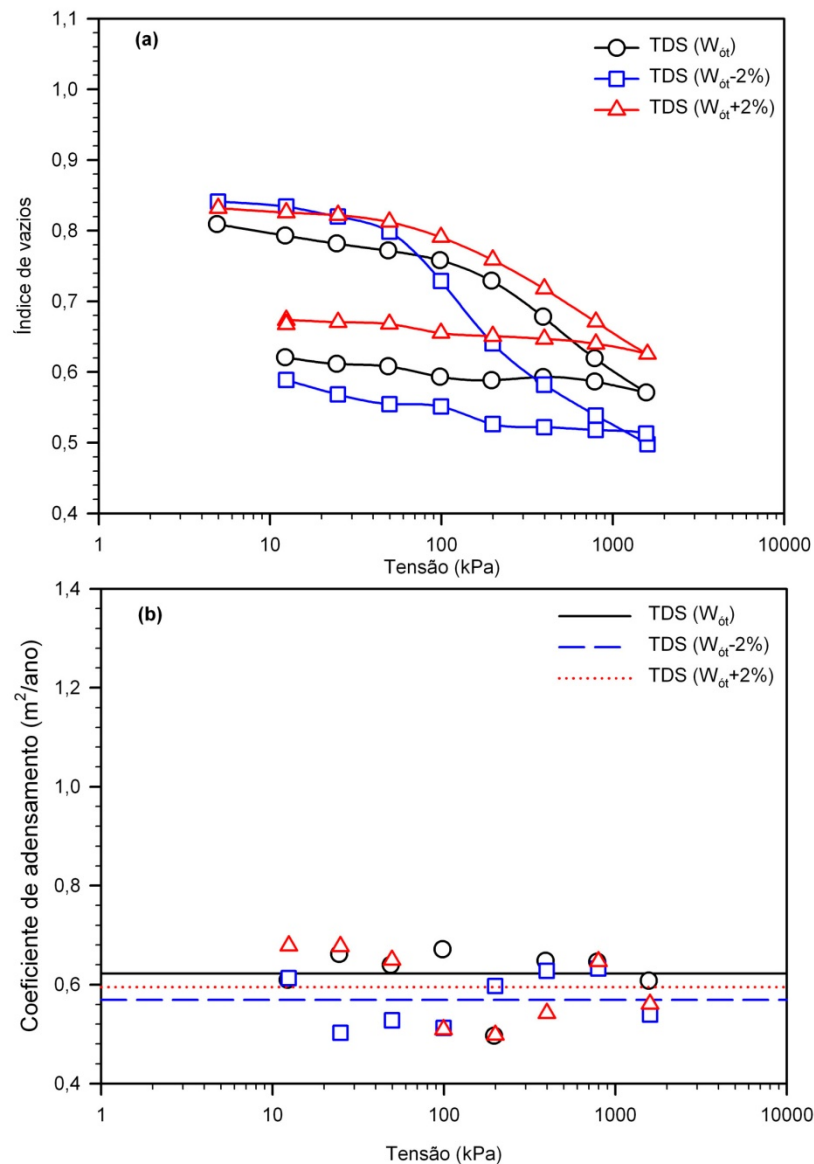
esse parâmetro varia com o nível de carregamento. Assim, optou-se por apresentar na parte inferior das 21 a 26 retas horizontais que representam os valores médios de  $c_v$ , para cada solo e teor de umidade, parâmetro este para fins de complementação de resultados.



**Figura 21.** Curvas de compressão edométrica (a) e coeficiente de adensamento (b) de corpos-de-prova do ST compactados no  $W_{ót}$  e  $W_{ót} \pm 2\%$ .

Na Figura 21(a), observa-se que o solo ST, na umidade ótima, apresenta um índice de vazios menor do que para os outros dois teores de umidade analisados, comportamento este esperado face ao fato de que os corpos-de-prova foram moldados com teores de umidade relativos aos ramos seco e úmido, bem como à umidade ótima da curva de compactação. Apesar de se estar empregando corpos-de-prova moldados com teores de

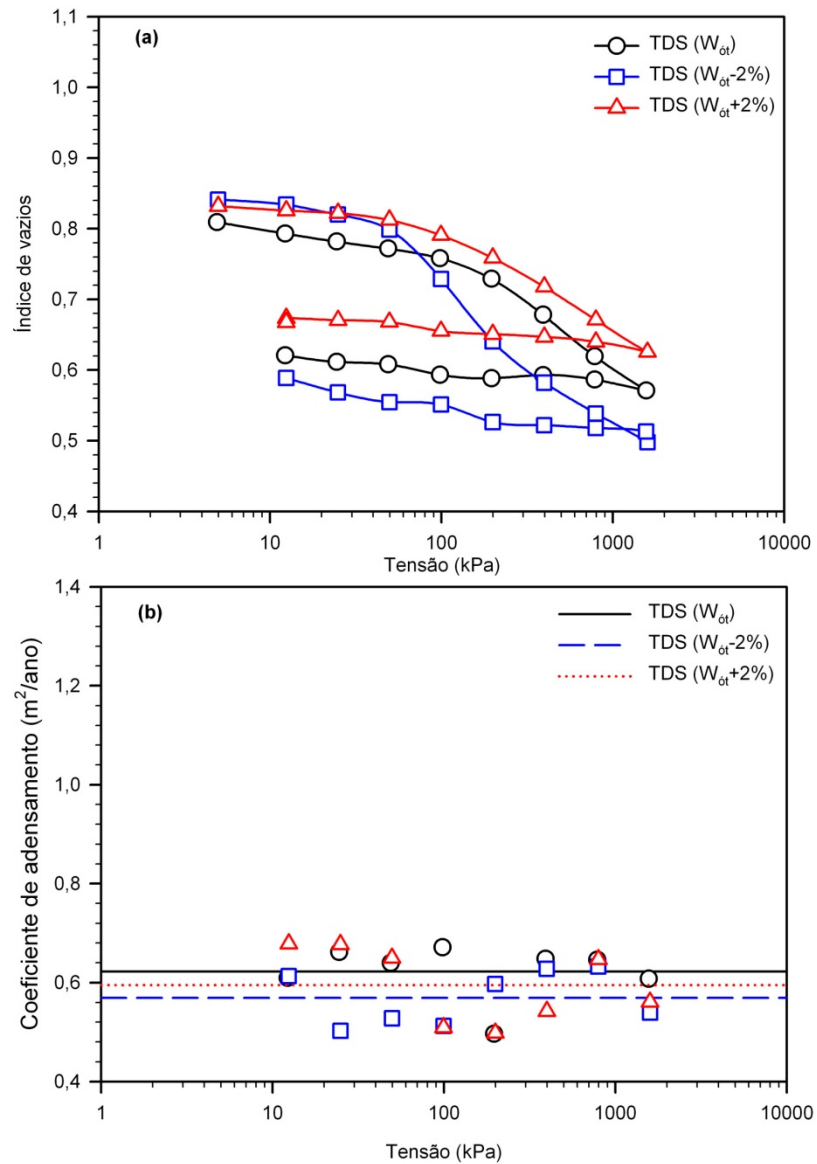
umidades distantes de 2% em relação à umidade ótima, observa-se que os seus índices de vazios iniciais não coincidem, haja vista que a curva de compactação do solo analisado apresenta maior coeficiente angular no seu ramo seco do que no úmido, como se ilustra na Figura 18. Observa-se, também, que a curva tensão versus índices de vazios do ST (ramo seco) atinge a reta virgem posteriormente à curva relativa ao ST (ramo úmido). Refere-se que o solo ST apresentou  $c_v$  da ordem de 1,08 m<sup>2</sup>/ano, 0,72 m<sup>2</sup>/ano e 0,68 m<sup>2</sup>/ano, respectivamente, para os teores de umidade  $W_{ót} - 2\%$ ,  $W_{ót}$  e  $W_{ót} + 2\%$ .



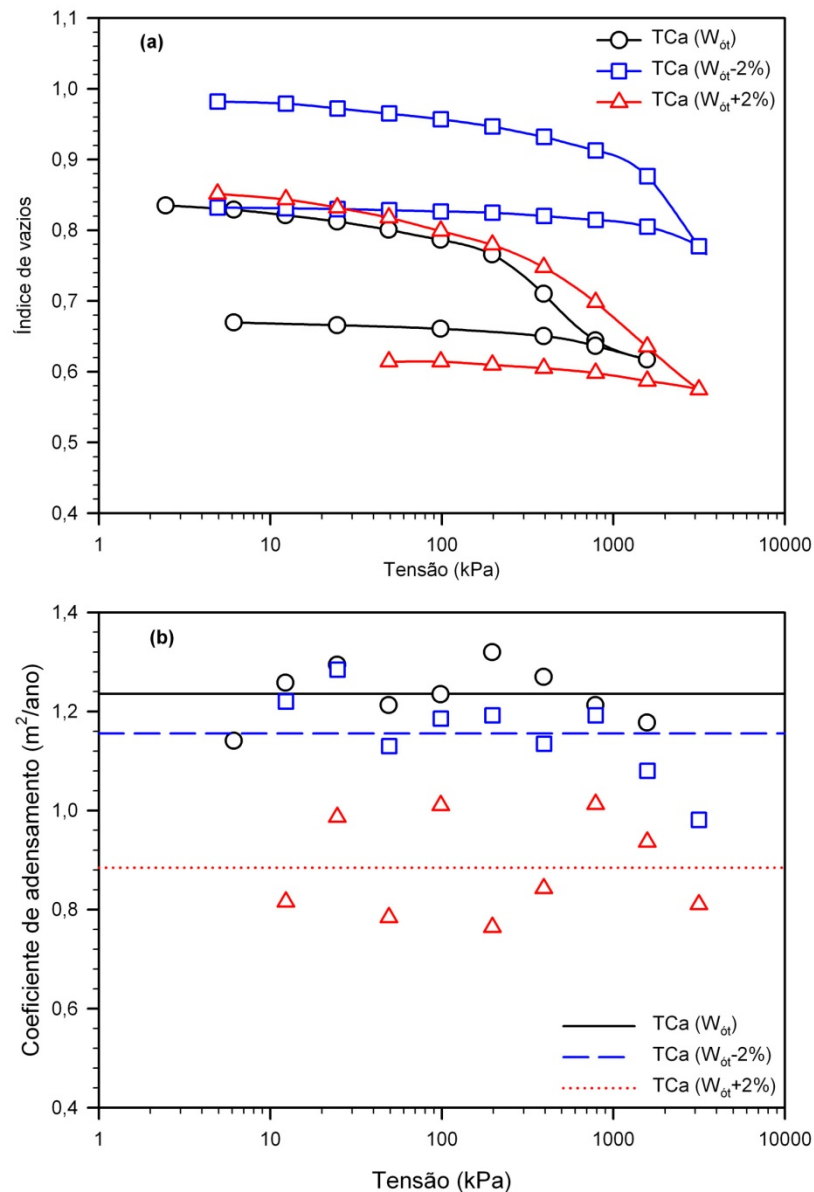
**Figura 22.** Curvas de compressão edométrica (a) e coeficiente de adensamento (b) de corpos-de-prova do TDS compactados no  $W_{ót}$  e  $W_{ót} \pm 2\%$ .

Na Figura 23(a), para o solo TDS, nota-se que as curvas referentes aos corpos-de-prova moldados nos ramos seco e úmido apresentam, inicialmente, índices de vazios muito próximos, refletindo a geometria da sua curva de compactação (Figura 18), onde os ramos seco e úmido apresentam inclinações semelhantes. Também, é notório que os índices de vazios iniciais dos corpos-de-prova desse tratamento são menores do que os apresentados no caso do solo ST. Para esse tratamento, observou-se que o corpo-de-prova moldado com menor teor de umidade apresentou uma menor tensão de pré-adensamento do que aquele moldado com o maior teor de umidade, o que é característico de solos não estruturados. Como já se abordou anteriormente, o redutor químico utilizado pode ter contribuído para a destruição parcial da estrutura natural, inicialmente floclada, observando-se, também, a ocorrência do fenômeno de aumento na espessura da dupla camada difusa do solo pela adição dos íons sódio. Observa-se que os valores de  $c_v$  obtidos para esse tratamento foram menores que os do ST, variando na faixa de 0,56 a 0,64 m<sup>2</sup>/ano.

Considerando os solos gerados pelo tratamento com cloreto de cálcio, Figura 24, infere-se que a curva referente ao corpo-de-prova moldado no ramo seco apresentou um índice de vazios inicial superior àqueles moldados na umidade ótima e no ramo úmido, novamente, devido à diferença de inclinação apresentada pelas retas da curva de compactação do solo, como se ilustra na Figura 18. Observa-se que a curva referente ao corpo-de-prova moldado na umidade ótima apresentou o menor índice de vazios inicial, sendo este um dos fatores que caracteriza a existência do ponto de ótimo de uma curva de compactação. Nota-se que os valores de  $c_v$  para esse tratamento variaram na faixa de 0,88 a 1,24 m<sup>2</sup>/ano, suplantando os valores obtidos para os solos ST e TDS.

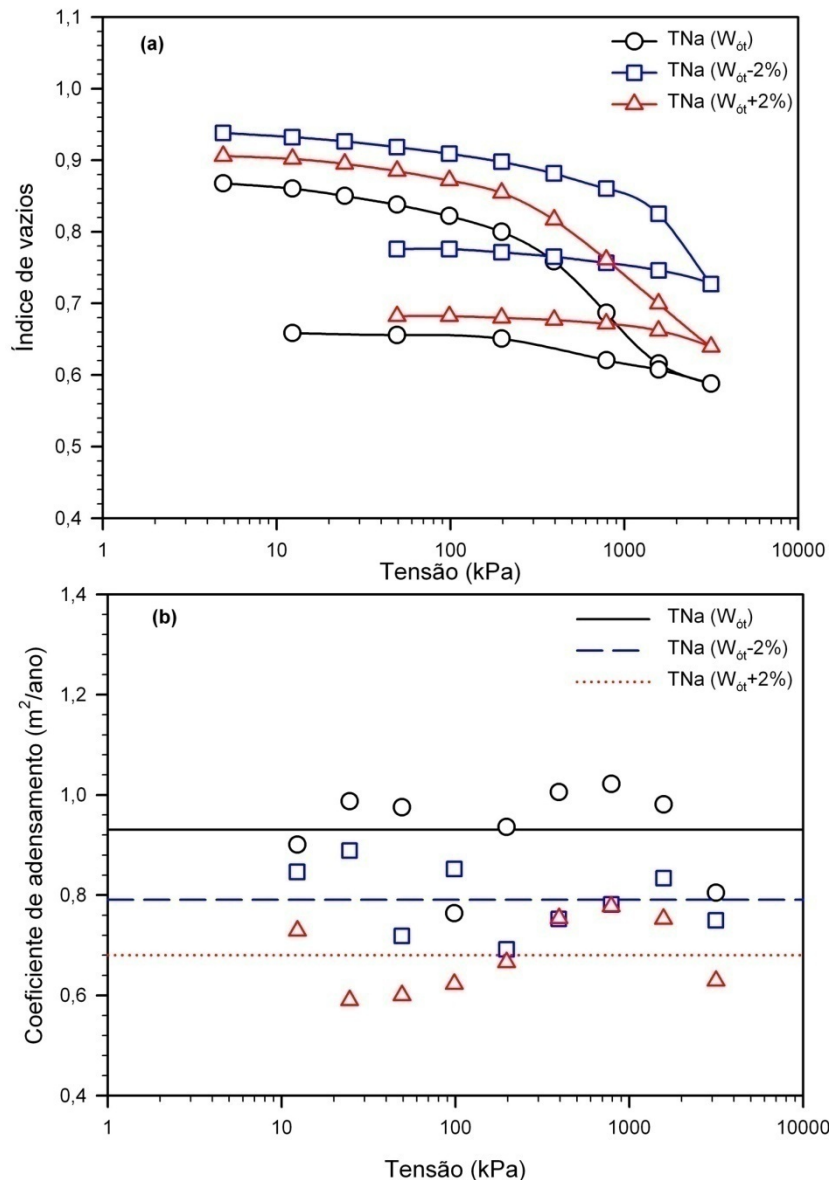


**Figura 23.** Curvas de compressão edométrica (a) e coeficiente de adensamento (b) de corpos-de-prova do TDS compactados no  $W_{ót}$  e  $W_{ót} \pm 2\%$ .



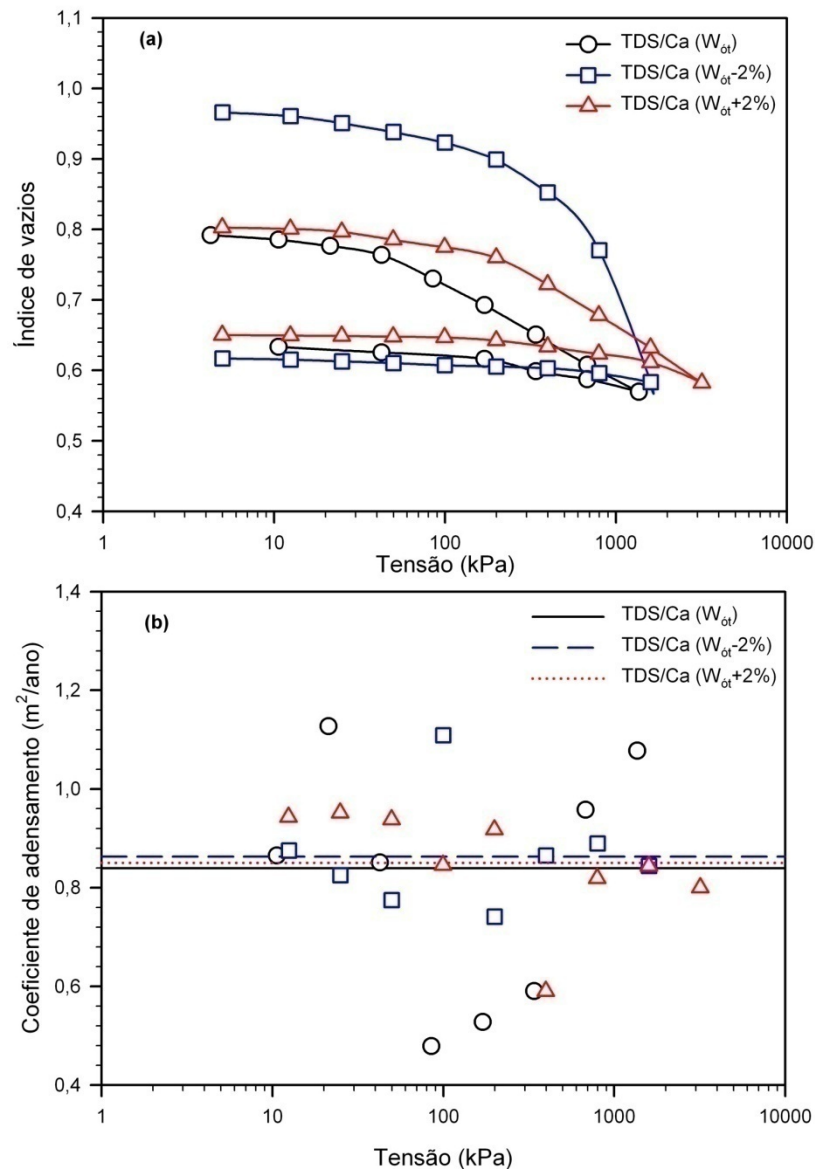
**Figura 24.** Curvas de compressão edométrica (a) e coeficiente de adensamento (b) de corpos-de-prova do TCa compactados no  $W_{ot}$  e  $W_{ot} \pm 2\%$ .

A Figura 25 traz os resultados do solo tratado com cloreto de sódio, onde se observou um comportamento bem definido do índice de vazios com os teores de umidade dos corpos-de-prova ensaiados, com valor maior para o ramo seco e valor intermediário para o ramo úmido da curva de compactação, bem como valor menor para a umidade ótima, como esperado. Com relação aos valores de  $c_v$  determinados para esse tratamento, observou-se que eles estavam na faixa 0,68 a 0,93  $m^2/ano$ , enquadrando-se em uma situação intermediária entre os solos ST e TCa.



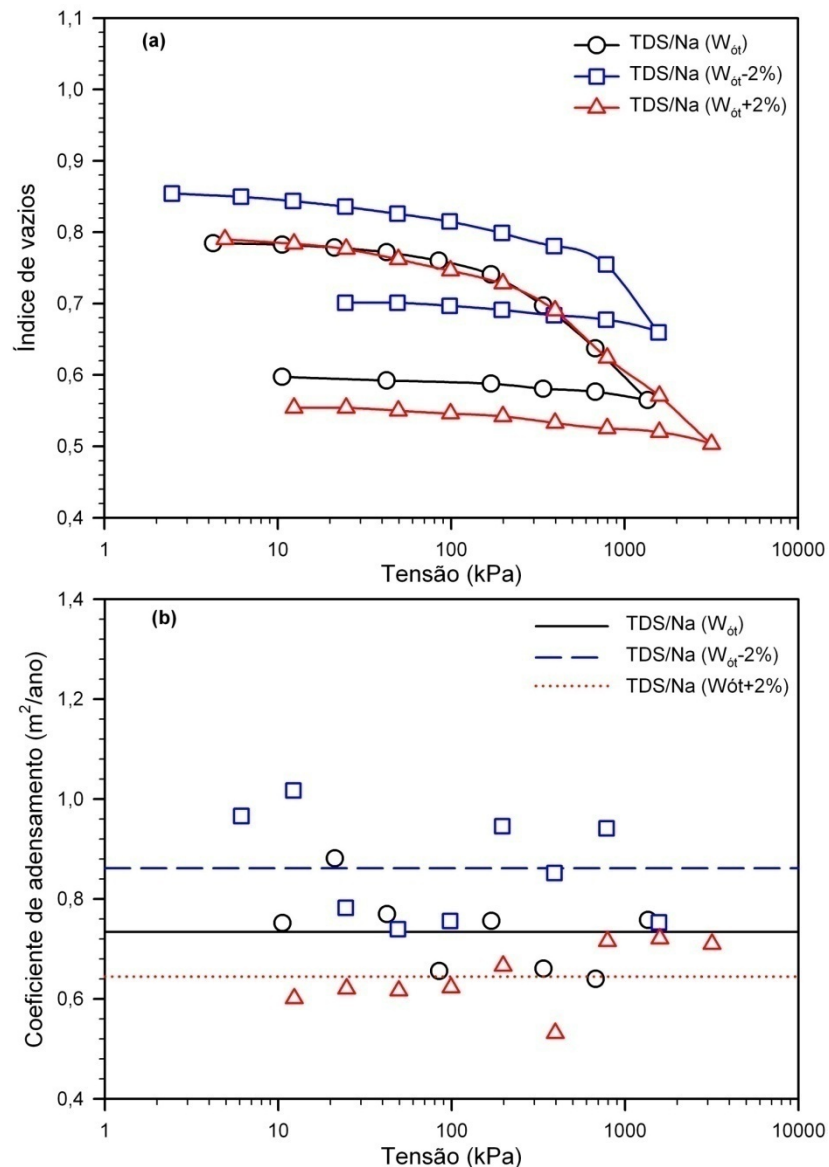
**Figura 25.** Curvas de compressão edométrica (a) e coeficiente de adensamento (b) de corpos-de-prova do TNa compactados no  $W_{ót}$  e  $W_{ót} \pm 2\%$ .

Na Figura 26, tem-se as curvas de compressão edométrica para o solo TDS/Ca e os coeficientes de adensamento para cada um dos teores de umidade estudados. Observa-se que o índice de vazios inicial do corpo-de-prova moldado na umidade  $W_{ót}+2\%$  se aproxima muito do moldado na umidade  $W_{ót}$ . Como se esperava, a curva com teor de umidade  $W_{ót}-2\%$ , devido ao efeito de sucção, atingiu a reta virgem com maiores tensões de compressão. Com respeito ao  $c_v$ , pode-se dizer que, para esse tratamento, ocorreu uma maior dispersão dos valores em relação à média, bem como que a sua faixa de variação foi menor, passando de 0,84 a 0,88  $m^2/ano$ .



**Figura 26.** Curvas de compressão edométrica (a) e coeficiente de adensamento (b) de corpos-de-prova do TDS/Ca compactados no  $W_{ót}$  e  $W_{ót} \pm 2\%$ .

Na Figura 27, apresentam-se as curvas de compressão edométrica do TDS/Na e os coeficientes de adensamento correspondente a cada curva. Assim como no tratamento exposto na Figura 26, a curva de compressão edométrica do corpo-de-prova referente à umidade  $W_{ót}+2\%$  praticamente se sobrepôs à curva de umidade  $W_{ót}$ , o que indicou uma proximidade de índice de vazios inicial. Os coeficientes de adensamento desse tratamento estão compreendidos em uma faixa que variou de  $0,54 m^2/ano$ , relativo ao corpo de prova moldado no ramo úmido, a  $0,86 m^2/ano$ , referente ao ramo seco da curva de compactação.



**Figura 27.** Curvas de compressão edométrica (a) e coeficiente de adensamento (b) de corpos-de-prova do TDS/Na compactados no  $W_{ót}$  e  $W_{ót} \pm 2\%$ .

Na Tabela 10, apresentam-se as tensões de pré-adensamento ( $\sigma_v$ ) determinadas para os solos analisados no presente trabalho. Destaca-se que essas tensões foram calculadas pelos métodos de Pacheco Silva e de Casagrande (PINTO, 2002). Para todos os tratamentos considerados, observou-se que os valores de  $\sigma_v$  variaram significativamente com o teor de umidade de moldagem dos corpos-de-prova, em especial quando considerou-se o ramo seco da curva de compactação. Refere-se que os ensaios de adensamento foram executados sem inundação, observando-se influência significativa da estrutura na resistência mecânica. Face aos resultados apresentados na Tabela 10, infere-se que, nos corpos-de-prova

moldados no ramo seco da curva de compactação, houve contribuição significativa da sucção para o aumento das tensões efetivas, o que redundou em maiores tensões de pré-adensamento em comparação àqueles moldados na umidade ótima e no ramo úmido da curva de compactação. Exceção ocorreu para o tratamento TDS, em que se observou um comportamento inverso, possivelmente devido à geração de estrutura dispersa.

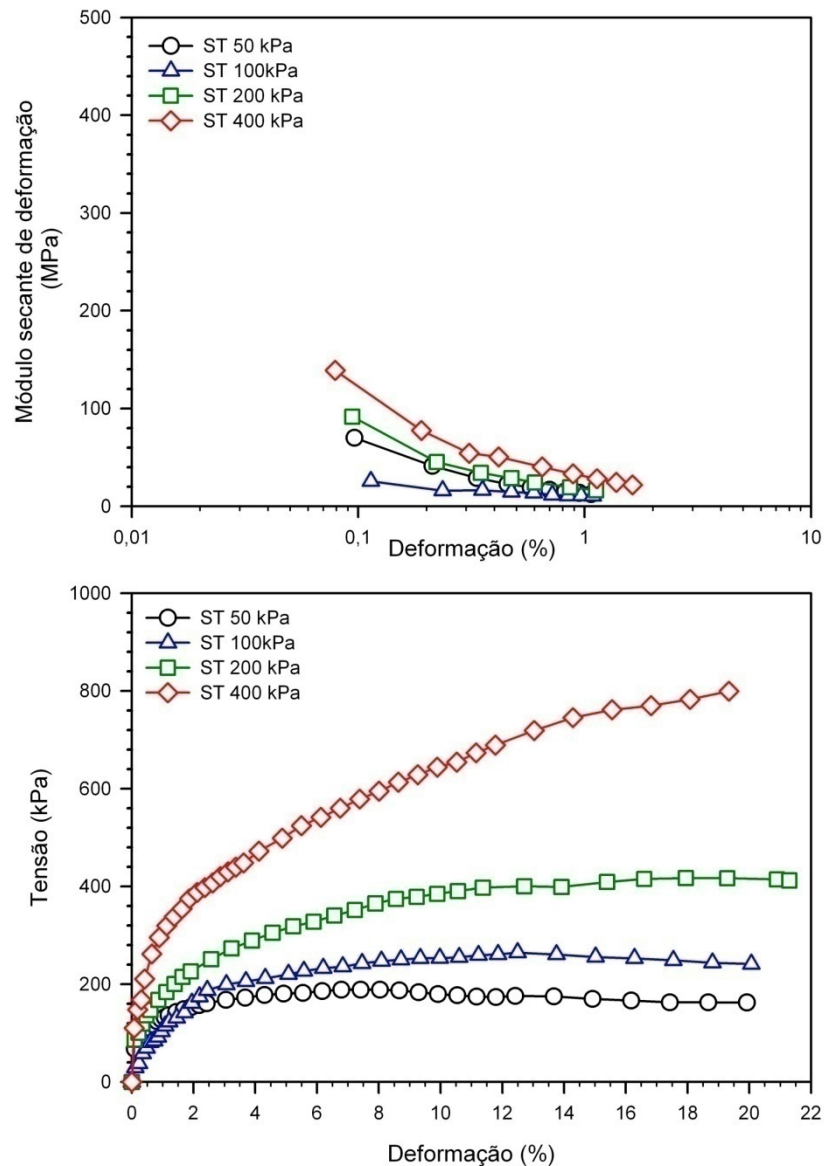
**Tabela 10.** Tensão de pré-adensamento ( $\sigma_v$ ) determinadas em ensaios de compressão edométrica realizados nos corpos-de-prova moldados na  $W_{ót}$  e  $W_{ót} \pm 2\%$

Amostra de solo	Tensão de pré-adensamento ( $\sigma_v$ ) em kPa					
	Pacheco Silva			Casagrande		
	$W_{ót} - 2\%$	$W_{ót}$	$W_{ót} + 2\%$	$W_{ót} - 2\%$	$W_{ót}$	$W_{ót} + 2\%$
ST	975	204	238	1050	197	265
TDS	50	122	100	53	138	95
TCa	1294	169	267	1315	194	345
TNa	1233	234	231	1294	272	267
TDS/Ca	578	38	200	516	47	228
TDS/Na	690	198	220	760	185	267

#### 4.3.6. Ensaios triaxiais

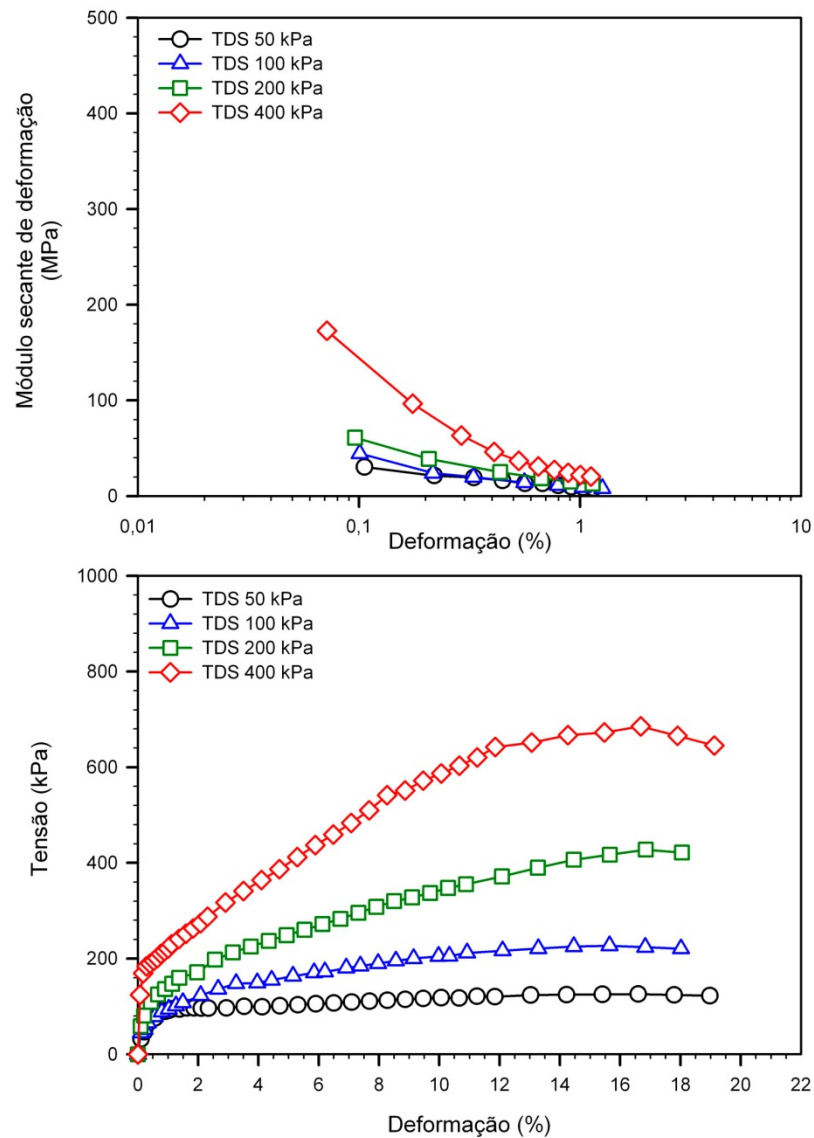
Os resultados dos ensaios triaxiais CID realizados em corpos-de-prova moldados nos parâmetros ótimos de compactação, encontram-se apresentados nas Figuras 27 a 32, onde se ilustra o comportamento das curvas tensão versus deformação e dos módulos secantes de deformação.

Com relação aos dados apresentados na Figura 28, observa-se que aumentos na tensão de confinamento aplicada geraram aumentos no módulo de deformação do solo ST, segundo padrões normais de solos estruturados. Por outro lado, a adição do ditonito de sódio e dos sais ao LVA levou a que essas curvas apresentassem comportamento mecânico do tipo dúctil, como se ilustra nas Figuras 28 a 32, observando-se aumentos significativos nos níveis de deformação, para as mesmas tensões aplicadas.



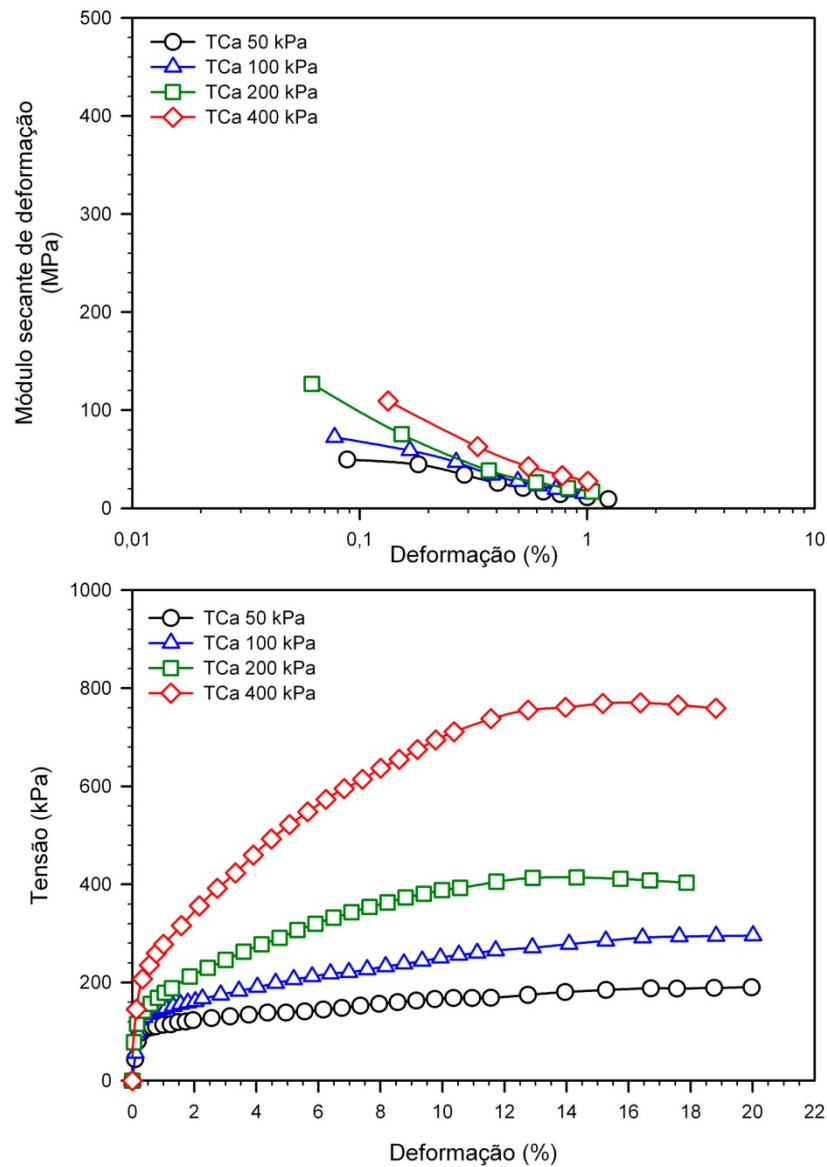
**Figura 28.** Curvas tensão versus deformação e módulos secantes de deformação obtidos em ensaios triaxiais CID realizados no solo ST.

Na Figura 29, da mesma forma que na anterior, aumentos de tensões de confinamento, como esperado, produziram aumentos nos módulos de elasticidade para o solo TDS. É possível observar também que os trechos elásticos das curvas tensão versus deformação são menores do que aqueles apresentadas pelo solo ST.



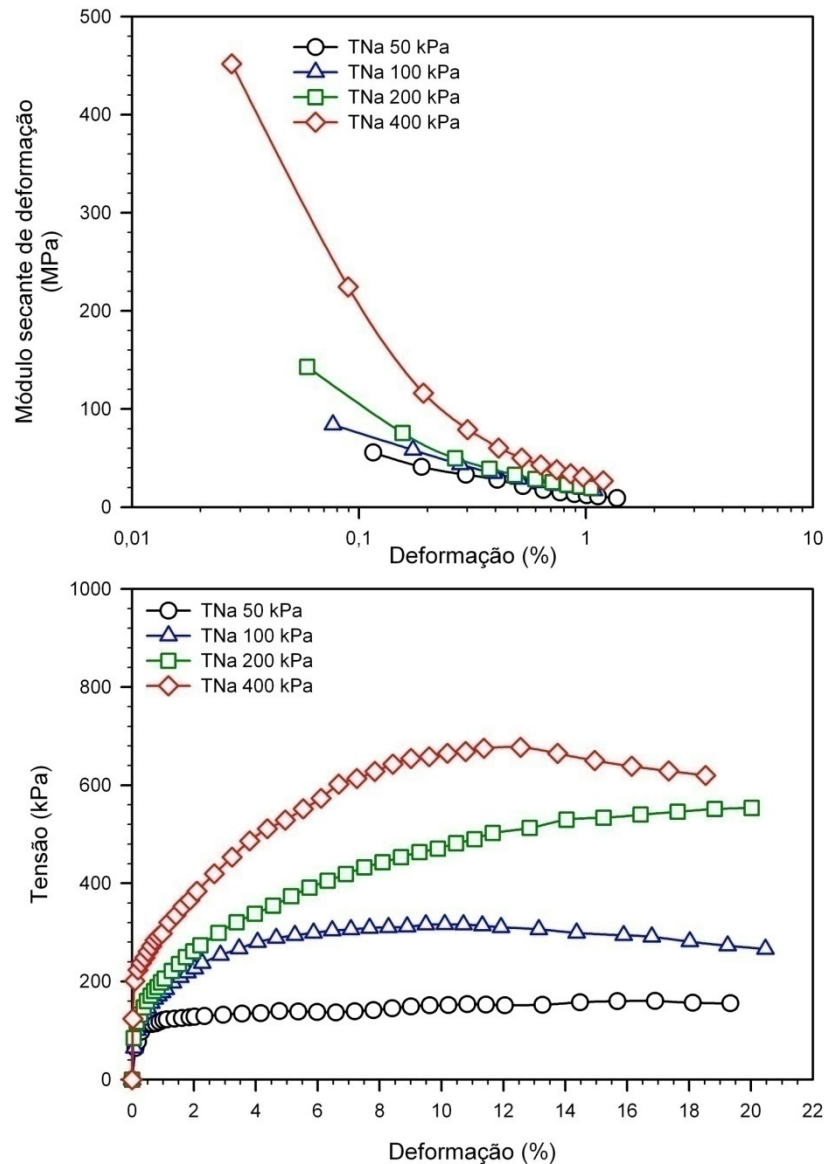
**Figura 29.** Curvas tensão versus deformação e módulos secantes de deformação obtidos em ensaios triaxiais CID realizados no solo TDS.

A Figura 30 mostra, em uma primeira parte, as curvas tensão versus deformação e, em segunda, as curvas módulo secante de deformação para o solo TCa. Aqui, pode-se fazer a mesma observação apresentada para a Figura 27, com respeito ao módulo secante de deformação e aos trechos elásticos das curvas tensão versus deformação, observando-se que os tratamentos aplicados ao LVA o tornaram mais dúctil.



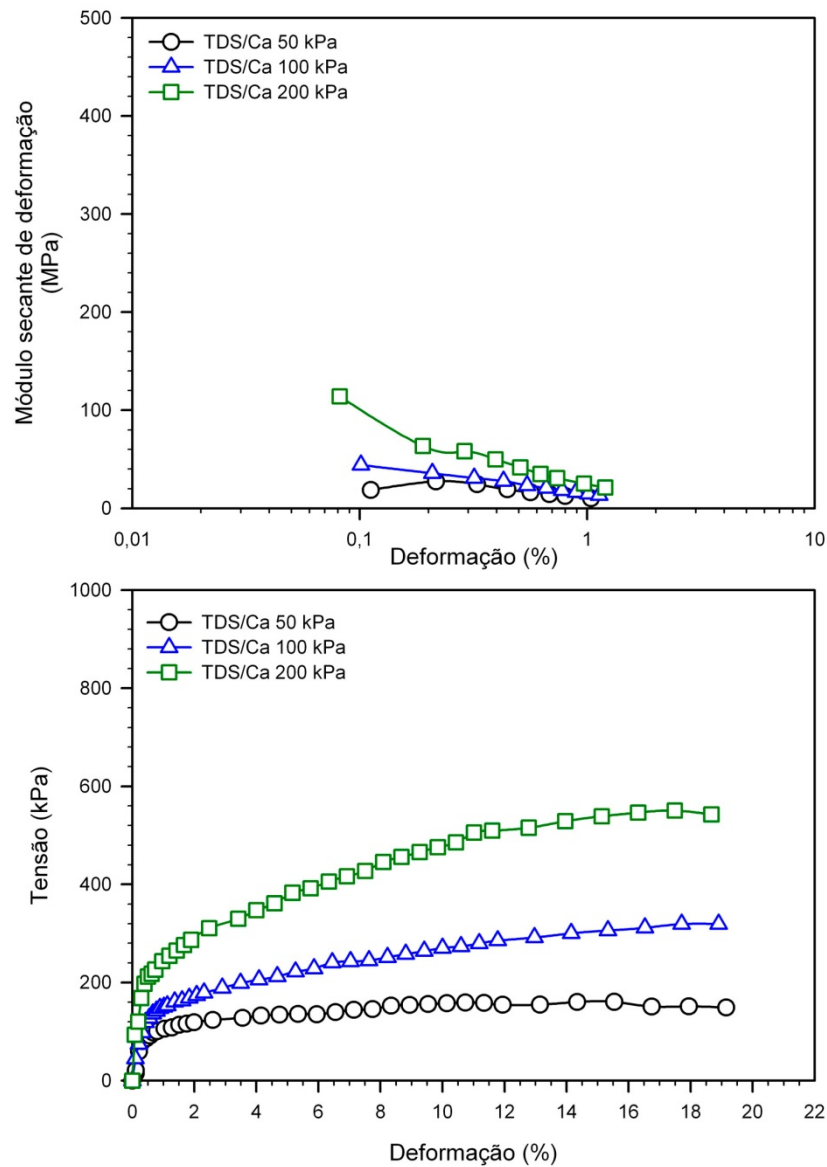
**Figura 30.** Curvas tensão versus deformação e módulos secantes de deformação obtidos em ensaios triaxiais CID realizados no solo TCa.

Na seqüência, na Figura 31 se expõem os resultados dos ensaios triaxiais para o solo TNa, observando-se que foi possível calcular o modulo secante, mesmo para pequenas deformações da curva de maior tensão de confinamento, mostrando-se mais claramente o aumento do modulo secante de deformação com o aumento da tensão de confinamento, como foi relatado no inicio desse tópico.



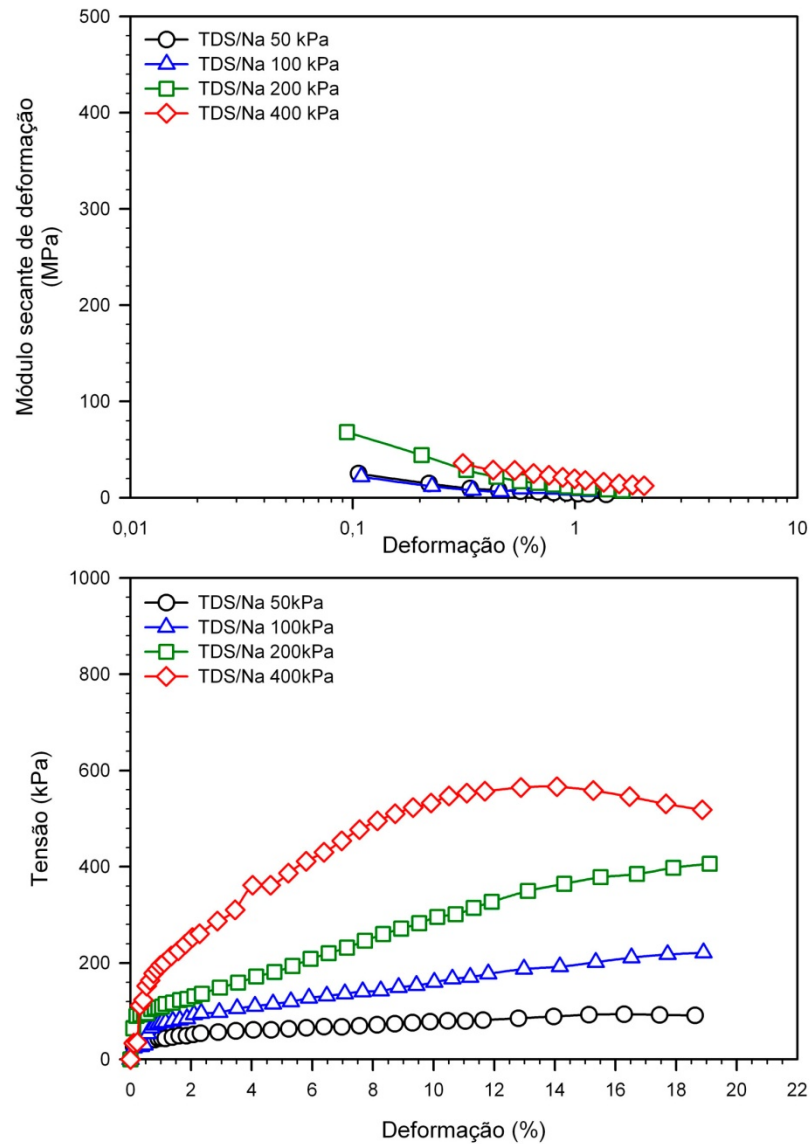
**Figura 31.** Curvas tensão versus deformação e módulos secantes de deformação obtidos em ensaios triaxiais CID realizados no solo TNa.

Em seqüência das discussões, passa-se aos resultados do ensaio triaxial do solo TDS/Ca apresentados na Figura 32. Devido às dificuldades na coleta de dados no trecho inicial da curva tensão versus deformação, não foi possível apresentar os valores calculados dos módulos secantes de deformação para deformações muito pequenas, pois não representariam a realidade do comportamento mecânico do solo. Ainda com respeito à Figura 32, não se apresentou a curva tensão versus deformação para a tensão de confinamento de 400 kPa, devido a problemas técnicos durante a execução do ensaio que levaram à perda do corpo-de-prova a ser ensaiado.



**Figura 32.** Curvas tensão versus deformação e módulos secantes de deformação obtidos em ensaios triaxiais CID realizados no solo TDS/Ca.

Na Figura 33, mostram-se os resultados dos ensaios triaxiais realizados no solo TDS/Na. Da mesma forma que para os demais tratamentos realizados com o LVA, esse solo apresentou comportamento mais plástico, com menores módulos de deformação e curvas de ruptura na sua maior parte no regime plástico, caracterizando-se como um material dúctil em comparação com o solo ST.

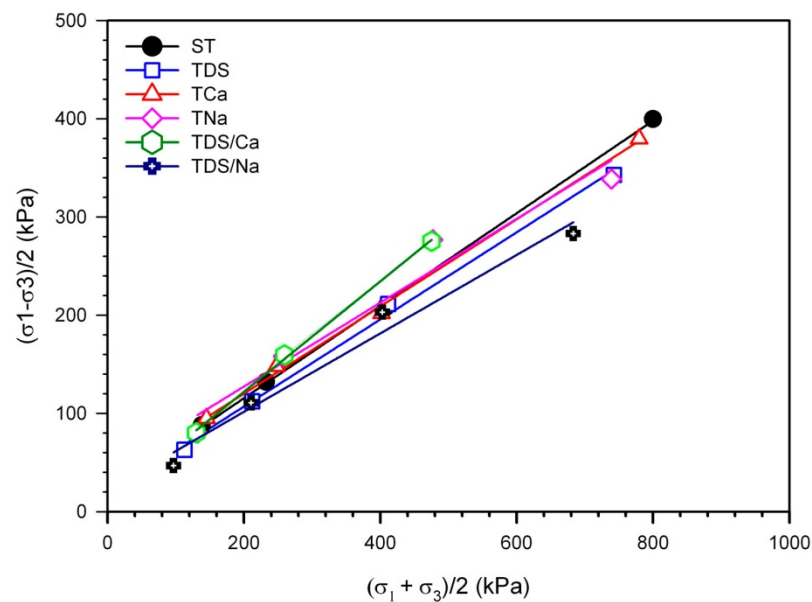


**Figura 33.** Curvas tensão versus deformação e módulos secantes de deformação obtidos em ensaios triaxiais CID realizados no solo TDS/Na.

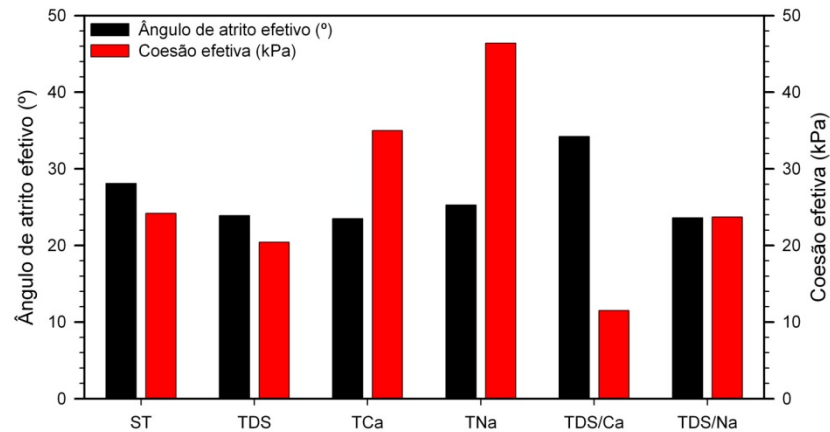
A Tabela 11 e a Figura 34 resumam os resultados dos ensaios triaxiais CID, com apresentação, respectivamente, dos parâmetros coesão ( $c'$ ) e ângulo de atrito ( $\phi'$ ), em termos de tensões efetivas, e das envoltórias de resistência ao cisalhamento dos solos analisados. Destaca-se que, na Tabela 11, apresentam-se as equações de ajuste de regressão, o valor  $R^2$  e os valores de  $c'$  e  $\phi'$  para cada tratamento, observando-se que todas as equações alcançaram um  $R^2$  acima de 0,99, o que indica uma boa reta de ajuste.

**Tabela 11.** Equações de regressão das envoltórias de ruptura para os tratamentos conferidos ao LVA

Amostras	Equações	R <sup>2</sup>	c' (kPa)	φ' (°)
ST	$d = 21,3395 + 0,4708 \beta$	0,9998	24,2	28,1
TDS	$d = 18,3032 + 0,4435 \beta$	0,9991	20,4	23,9
TCa	$d = 31,3635 + 0,4439 \beta$	0,9995	35,0	23,5
TNa	$d = 41,9306 + 0,4271 \beta$	0,9962	46,4	25,3
TDS/Ca	$d = 9,5073 + 0,5624 \beta$	0,9998	11,5	34,2
TDS/Na	$d = 27,7148 + 0,3995 \beta$	0,9945	23,7	23,6

**Figura 34.** Envoltórias de rupturas em termos de tensões efetivas dos solos: ST, TDS, TCa, TNa, TDS/Ca e TDS/Na.

Na Figura 35, ilustra-se a variação dos parâmetros coesão e ângulo de atrito na forma de um diagrama de barras para os solos ensaiados, observando-se que o ângulo de atrito aumentou apenas para o solo TDS/Ca, passando de 28,1° para 34,2°, ao passo que a coesão aumentou de forma expressiva para as amostras tratadas com os sais NaCl e CaCl<sub>2</sub>, alcançando ganhos de 91,7% e de 44,6% respectivamente.



**Figura 35.** Parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito em termos de tensões efetivas) para os referidos tratamentos.

Finalizando, vale referir que embora tenham ocorrido mudanças nos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo ( $c'$  e  $\phi'$ ) do LVA após a aplicação dos tratamentos, como se ilustra nos resultados apresentados na Tabela 11 e na Figura 35, não se observou mudanças significativas nas envoltórias de resistência ao cisalhamento ilustradas na Figura 34.

Embora tenham ocorrido variações expressivas nos resultados dos ensaios de caracterização geotécnica e compactação do LVA e dos solos produzidos com os tratamentos empregados, para fins práticos, não se observou mudanças significativas nos resultados dos ensaios realizados de resistência mecânica, compressibilidade e condutividade hidráulica.

## 5. Conclusões

---

A partir da análise dos resultados do presente trabalho foi possível concluir que:

- obteve-se sucesso no desenvolvimento de métodos de tratamento dos solos, englobando mudanças mineralógicas e químicas. Destaca-se que esses métodos, inicialmente concebidos para aplicações de laboratório, podem ser facilmente implementados para situações geotécnicas específicas de campo;
- os tratamentos empregados modificaram significativamente os parâmetros de plasticidade do solo, observando-se reduções expressivas no IP, exceto para os solos tratados com NaCl e  $\text{CaCl}_2$  (TNa e TCa);
- os tratamentos utilizados foram responsáveis pela geração de estruturas dispersas, favorecendo o processo de compactação e causando mudanças expressivas nas curvas de compactação e nos parâmetros ótimos de compactação do LVA;
- quanto aos resultados dos ensaios de compressão não-confinada, observou-se que os tratamentos foram, em geral, responsáveis por reduções pequenas na resistência mecânica em relação ao LVA, exceto para o tratamento TDS/Na, onde se verificou a ocorrência de um ganho expressivo de resistência mecânica;
- foram observadas variações pequenas nos coeficientes de condutividade hidráulica, atingindo-se redução máxima de 5 vezes, no caso dos solos TDS/Ca e TDS/Na;
- os resultados dos ensaios de compressão edométrica mostram que as tensões de pré-adensamento resultaram significativamente maiores para os corpos-de-prova moldados no ramo seco da curva de compactação, indicando uma influência significativa da sucção no processo, bem como se observou a

ocorrência de valores menores, para todos os teores de umidade ensaiados para os tratamentos com ditonito de sódio, em especial aquele empregando apenas este produto;

- no que se refere aos resultados dos ensaios triaxiais, observou-se uma mudança significativa no comportamento das curvas tensão versus deformação, que passaram a apresentar maior ductilidade com os tratamentos aplicados. Destaca-se que embora tenham ocorrido mudanças nos parâmetros de resistência ao cisalhamento do LVA após a aplicação dos tratamentos, para fins práticos, não se observou alteração significativa nas envoltórias de resistência ao cisalhamento, com exceção do TDS/Ca.

## **6. Sugestões para trabalhos futuros**

---

Sugestões para trabalhos futuros são, como segue:

- incorporação ao presente estudo de uma componente geoambiental direcionada à análise da adsorção de contaminantes;
- ampliação do presente trabalho, com a inclusão do estudo de solos homoiônicos gerados a partir do LVA, com a identificação de íons específicos de interesse geoambiental e a análise de suas influências no comportamento geotécnico do solo;
- ampliação do presente estudo para outras classes de solos.

## Referências Bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **MB 3336: Solo - ensaio de adensamento unidimensional: método de ensaio.** Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1990. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: método de ensaio.** Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1986a. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo - determinação do limite de liquidez: método de ensaio.** Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1984a. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica: método de ensaio.** Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1984b. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo - determinação do limite de plasticidade: método de ensaio.** Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1984c. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo - análise granulométrica: método de ensaio.** Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1984d. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo - ensaio de compactação: método de ensaio.** Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1986b. 10 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770: Solo coesivo - determinação da resistência à compressão não-confinada: método de ensaio.** Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1992. 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545: Solo - determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável: método de ensaio.** Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 2000. 12 p.

- AZEVEDO, M. A. A. **Contribuição ao estudo geotécnico de solos de Viçosa-MG**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG: [s.n.], 1999. 169 p.
- CARDOSO, D. L. **Contribuição à identificação e tratamento dos solos expansivos da região de Viçosa-MG**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG: [s.n.], 1994. 194 p.
- CORRÊA, G. F. **Modelo de evolução e minealogia da fração argila de solos do planalto de Viçosa, MG**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG: [s.n.], 1984. 87 p.
- COSTA, J. B. **Caracterização e constituição do solo**. Lisboa: A. Coelho Dias S.A., 2004. - 7ª edição: 527 p.
- DEER, W. A.; HOWIE, R. A; ZUSSMAN J. **An introduction to the rock forming minerals**. New York-NY: Longman Scientific & Technical, 1992. - 2<sup>nd</sup> edition: 712 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro-RJ: Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa, Instituto de Pesquisa Rodoviária (IPR), 2006. - 3ª edição: Vol. 719: 274 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro-RJ: Serviço Nacional de Levantamento de Solos: [s.n.], 1997. 212 p.
- FANG, H. Y. **Introduction to environmental geotechnology**. New York-NY: CRC Press, 1997. 652 p.
- FERNANDES, D. C. M. **Viabilidade do uso do alcatrão de madeira de eucalipto na estabilização de solos residuais para fins rodoviários**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal (Transporte e Colheita Florestal), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG: [s.n.], 2000. 124 p.
- FERRAZ, R. L. **Contribuição à estabilização dos solos para fins rodoviários e habitacionais**. Dissertação de Mestrado, Programa de

- Pós-Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG: [s.n.], 1994. 174 p.
- FONTES, M. P. F. **Mineralogia do solo**. Notas de aula. Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG: [s.n.], 2006a. 139 p.
- FONTES, M. P. F. **O solo como um sistema disperso**. Notas de aula. Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG: [s.n.], 2006b. 56 p.
- FONTES, M. P. F. **Troca iônica**. Notas de aula. Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG: [s.n.], 1990. 72 p.
- FOTH, H. D. **Fundamentals of Soil Science**. New York-NY: Jhon Wiley and Sons, 1990. – 8<sup>th</sup> edition: 360 p.
- GRIM, R. E. **Clay Mineralogy**. New York-NY: McGRAW-HILL BOOK COMPANY INC, 1968. - 2<sup>nd</sup> edition: 596 p.
- HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing: permeability, shear strength and compressibility tests**. New York-NY: John Wiley and Sons Inc., 1982. Vol. 2: 412 p.
- KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. Belo Horizonte-MG: **Geonomos**, 5(1), 1997. P 17-40.
- LAMBE, T. W. The structure of compacted clays. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering**, ASCE, v. 84, No. SM2, p. 1654 -1 – 1654-34, 1958.
- LIMA, D. C.; MACHADO, C. C.; CARVALHO, C. A. B.; SILVA, C. H. C.; PEREIRA, R. S.; TRINDADE, T. P.; BARBOSA, P. S. A. A experiência da UFV no emprego de estabilizantes químicos em estradas florestais. In: Brazilian Symposium On Harvesting And Wood Transport. - Belo Horizonte-MG. **Proceedings...** : Florestais, Sociedade de Investigações, 2003. – p 69-117.
- MITCHELL, J. K. **Fundamentals of Soil Behavior**. London-NY: John Wiley and Sons, Inc., 1993. 2<sup>nd</sup> edition: 422 p.
- NOGAMI, J. S. **A importância da suplementação dos resultados de ensaios geotécnicos para finalidades rodoviárias, com dados geológicos e correlatos**. Rio de Janeiro-RJ: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 1971. Vol. 516. 44 p.

- NOGAMI, J. S; VILLIBOR D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo-SP: Villibor, 1995. 213 p.
- OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P. K. T.; CAMARGO, M. N. **Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento**. Jaboticabal-SP: FUNEP, 1992. - 2ª edição: 201 p.
- PINTO, O. C. B. **Estrutura dos minerais argilosos**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa: Imprensa Universitária, 1971. 36 p.
- PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo-SP: Oficina de texto, 2002. 2ª edição. 355 p.
- QUINTEIRO, F. Q. L. **Levantamento do uso da terra e caracterização de ambientes da bacia hidrográfica do rio Turvo Sujo com a utilização de aerofotos não-convencionais**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG: [s.n.], 1997. 91 p.
- RAMALHO, G. G. C. **Mapeamento geotécnico de Viçosa com uso de sistema de informações geográficas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG: [s.n.], 1994. 110 p.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. G. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Viçosa-MG: NEPUT, 2002. 338 p.
- RESENDE, S. B. **Estudo de crono-topossequências em Viçosa-MG**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Solos) Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG: [s.n.], 1971. 171 p.
- SANT'ANA, A. P. **Caracterização tecnológica de misturas solo-escória de alto-forno moída para fins rodoviários**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG: [s.n.], 2003. 76 p.
- SANT'ANNA, G. L. **Módulo de resiliência de misturas solo-alatirão, solo-cal-alcatrão e solo-cimento-alcatrão para pavimentação**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal (Transporte e Colheita Florestal), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG: [s.n.], 2002. 124 p.
- SCHAEFER, C. E. G. R. The B horizon microstructure of Brazilian latosols as long-term biotic constructs. **Australian Journal of Soil Research**.

- Collingwood, AUSTRALIE: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization CSIRO. 2001. - n° 5 : Vol. 39. 909-926 p.
- TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil mechanics in engineering practice**. New York-NY: John Wiley and Sons, 1967. - 2<sup>nd</sup> edition: 729 p.
- TRINDADE, T. P. **Caracterização tecnológica de três solos residuais estabilizados quimicamente com vistas a aplicações em geotecnia rodoviária e ambiental**. D.Sc. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia). Viçosa-MG: [s.n.], 2006. 251 p.
- TRINDADE, T. P.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; BARBOSA, P. S. A.; SILVA, C. H. C.; MACHADO, C. C. **Compactação dos solos – fundamentos teóricos e práticos**. Viçosa-MG, Editora UFV, 2008. 95 p.
- VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo-SP: McGraw-Hill do Brasil LTDA (Editora da Universidade de São Paulo), 1977. 509 p.
- VAUGHAN, P. R. Contribution to the study of residual and other structured soils. USA/Brazil Geotechnical Workshop: Application of Classical Soil Mechanics Principles to Structured Soils, **Proceedings...** - Belo Horizonte-MG: UFV/NSF (USA)/CNPq/CEMIG: [s.n.], 1994.p 338-347.
- VIEIRA, S. V. **Estabilização de solos com licor negro Kraft concentrado para fins rodoviários**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG: [s.n.], 1994. 126 p.