

**FERNANDO PAULO CANESCHI**

**ESTUDOS GEOAMBIENTAIS EM SOLOS MODIFICADOS QUIMICAMENTE**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2012

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

T

C221e  
2012

Caneschi, Fernando Paulo, 1982-

Estudos geoambientais em solos modificados quimicamente /  
Fernando Paulo Caneschi. – Viçosa, MG, 2012.  
xvii, 117f. : il. ; (algumas color.) ; 29cm.

Orientador: Dario Cardoso de Lima  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Mecânica do solo. 2. Metais pesados. 3. Solos -  
Absorção. 4. Latossolos. 5. Solos - Percolação. 6. Química do  
solo. 7. Solos - Testes. 8. Solos - Permeabilidade. 9. Troca  
iônica. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil. II. Título.

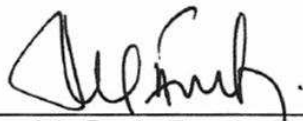
CDD 22. ed. 624.15136

FERNANDO PAULO CANESCHI

**ESTUDOS GEOAMBIENTAIS EM SOLOS MODIFICADOS QUIMICAMENTE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para a obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

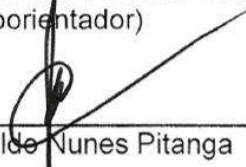
APROVADA: 05 de novembro de 2012



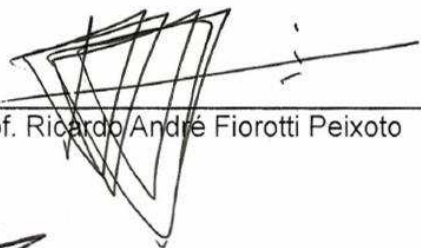
Prof. Maurício Paulo Ferreira Pontes  
(Coorientador)



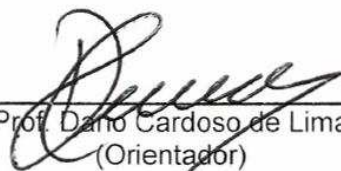
Prof. Taciano Oliveira da Silva



Prof. Heraldo Nunes Pitanga



Prof. Ricardo André Fiorotti Peixoto



Prof. Danilo Cardoso de Lima  
(Orientador)

*Dedico este trabalho à minha filha e minha esposa!*

---

## AGRADECIMENTOS

### Agradeço

A Deus, pelo dom da vida, que sem isso não poderia ter concluído esse trabalho.

À minha esposa, por sempre me apoiar e incentivar para a conclusão desse trabalho, estando sempre ao meu lado, nos momentos fáceis e difíceis e por todo o carinho dedicado.

Aos meus pais e ao meu irmão pelo incentivo e companheirismo, que sempre, nos momentos de fraquejo, me reergueram.

A todos os meus colegas de trabalho, que estiveram juntos comigo no desenrolar desse projeto, independente de qual parte.

Aos meus amigos universitários e não universitários, pelos momentos de descontração, partilhas de ideias e outras coisas mais.

À CAPES, pela bolsa de doutorado, à FAPEMIG pelas bolsas de iniciação científica concedidas ao aluno de graduação Weiner Gustavo Silva Costa através do PROBIC FAPEMIG/UFV, via os Processos TEC-APQ-00378-08 e TEC-PPM-00081-10 e, ao CNPq pelo apoio financeiro através dos processos CNPq nº 303143/2007-0 e 304171/2010-7.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), por ter proporcionado um ganho de conhecimento durante todos esses anos como discente, pelos recursos, físicos, mentais e sociais que ofereceram para a conclusão de minha vida acadêmica.

Ao Departamento de Solos (DPS), em especial aos Laboratórios de Absorção Atômica e de Mineralogia, que auxiliaram imensamente na execução deste trabalho, em especial ao Carlinhos do Laboratório de Absorção Atômica e ao José Francisco do Laboratório de Mineralogia.

Ao Departamento de Engenharia Civil (DEC) e ao Laboratório de Engenharia Civil (LEC), que além da infraestrutura para o desenvolvimento do presente projeto, ofereceram um ambiente excelente para se trabalhar, criando e cultivando amizades ao longo de minha passagem.

Ao professor, orientador e amigo Dario Cardoso de Lima, por sempre acreditar na capacidade de desenvolvimento dessa pesquisa, pelo apoio e orientação na carreira profissional.

Ao professor Maurício Paulo Ferreira Fontes, coorientador, por sempre estar disposto a contribuir para o enriquecimento dessa pesquisa, seja por meio de orientação ou na realização de ensaios no DPS.

Ao amigo, colega e também coorientador Thiago Pinto da Trindade, que sempre demonstrou grande interesse em contribuir para o desenvolvimento deste projeto, desde antes do início da ideia.

Ao professor e amigo Paulo Sérgio de Almeida Barbosa, pelo auxílio inestimável na construção do equipamento de percolação em coluna de solo utilizado neste trabalho. Agradeço por todos os momentos que passamos juntos, convivência social, troca de experiências. Com ele aprendi a questionar mais e, com certeza, acreditar mais nas ideias.

À Tornearia do Alexandre, em especial ao proprietário Alexandre pelo seu desempenho e dedicação na execução do equipamento aqui desenvolvido.

Aos amigos Flavio Alessandro Crispim, Renato Mareto e todos aqueles que fizeram parte da minha vida acadêmica.

Ainda, a todos aqueles que de maneira direta ou indireta contribuíram minimamente que seja para a elaboração deste trabalho e que infelizmente não foram citados neste texto.

Ao amigo Weiner Gustavo Silva Costa, pela sua dedicação, empenho na execução dos ensaios e outras características que não expressei por meio de palavras.

---

## RESUMO

CANESCHI, Fernando Paulo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2012. **Estudos geoambientais em solos modificados quimicamente.** Orientador: Dario Cardoso de Lima. Coorientadores: Mauricio Paulo Ferreira Fontes e Tiago Pinto da Trindade.

O presente trabalho teve por objetivo proceder à modificação da fração fina de um solo argiloso típico da região Sudeste do Brasil, da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, com vistas a aplicações em obras geotécnicas de caráter ambiental. A realização deste trabalho englobou as seguintes etapas: (i) construção de um equipamento para a realização de ensaios de percolação em coluna com o emprego de gradientes hidráulicos elevados; (ii) desenvolvimento de processos de mudanças no complexo iônico do solo com vistas a aplicações de campo; (iii) realização de ensaios de percolação em coluna no solo e nos solos modificados para medição da condutividade hidráulica e avaliação da influência do gradiente hidráulico na capacidade de retenção dos metais pesados Cd, Mn, Ni, Pb e Zn; (iv) comparação de parâmetros geotécnicos do solo e dos solos modificados; e (v) avaliação da distribuição dos metais pesados ao longo dos corpos de prova ensaiados e da intensidade do potencial de adsorção destes pelos solos analisados via extração sequencial. Para fins de terminologia, o solo natural e os solos modificados quimicamente foram denominados: solo sem tratamento (ST); solo ST tratado com cálcio (TCa); solo ST tratado com sódio (TNa); e solo ST tratado com cal hidratada (TCAL). Trabalhou-se com uma solução multiespécie com os metais pesados Cd, Mn, Ni, Pb e Zn, para uso nos ensaios de percolação em coluna utilizando-se os gradientes hidráulicos de 15, 45, 66 e 87. De posse dos resultados obtidos no estudo, para fins práticos de engenharia, concluiu-se que: (i) o equipamento desenvolvido para a realização dos ensaios de percolação em coluna atendeu aos objetivos almejados; (ii) em comparação com o solo ST, os solos TCa e TNa apresentaram mudanças significativas nos limites de Atterberg (LL e LP), mostrando-se mais plásticos e observando-se,

---

também, aumento da e redução do teor de umidade ótimo, bem como alteração não significativa na granulometria; (iii) no solo TCAL, observou-se a redução da fração fina de sua granulometria e mudanças não significativas nos parâmetros ótimos de compactação; (iv) variações de gradiente hidráulico, independentemente do tipo de solo, não produziram variações significativas no coeficiente de condutividade hidráulica; (v) variações de gradiente hidráulico refletiram-se em comportamentos diferentes do processo de retenção de metais pesados nos solos ST, TCa e TNa, revelando uma tendência de redução do coeficiente de retardamento à medida que se reduziu o gradiente hidráulico no ensaio de percolação em coluna; contudo, no caso do solo TCAL, não foi possível calcular o seu fator de retardamento, já que os metais ficaram retidos na massa de solo; (vi) os solos não apresentaram grandes modificações na resistência mecânica, com exceção do solo TCAL que mostrou melhorias consideráveis do ponto de vista de engenharia, considerando-se resultados dos ensaios de compressão não confinada, cisalhamento direto e ensaios com o cone penetrométrico quase-estático, verificando-se, também, que este solo apresentou comportamento mais dúctil que os demais; (vii) com relação aos resultados dos ensaios de retração, os tratamentos empregados no solo ST não levaram a mudanças significativas no parâmetro retração; e (viii) tomando-se o solo ST como referência, o solo TCAL foi aquele que apresentou maior capacidade de adsorção dos metais pesados em estudo, uma vez que praticamente todo o quantitativo da solução multiespécie foi adsorvido em sua massa; com relação aos demais solos, estes mantiveram comportamentos semelhantes e até mesmo inferiores ao solo ST.



---

## ABSTRACT

CANESCHI, Fernando Paulo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2012. **Geoenvironmental studies in chemically modified soils**. Advisor: Dario Cardoso de Lima. Co-advisors: Mauricio Paulo Ferreira Fontes and Tiago Pinto da Trindade.

The present study was directed to the modification of the fine grained fraction of a typical clayey soil from the Southeast of Brazil, specifically from the Zona da Mata de Minas Gerais, for geoenvironmental applications. The study encompassed the following steps: (i) construction of an equipment for performing column percolation test using high hydraulic gradients; (ii) development of soil ionic complex change processes regarding field applications; (iii) column percolation tests in the soil and modified soils in order to evaluate the influence of the hydraulic gradient in their hydraulic conductivity and retention capacity of the heavy metals Cd, Mn, Ni, Pb and Zn; (iv) comparison of geotechnical parameters of the soil and the modified soils; and (v) evaluation of the distribution of heavy metals over the tested soils specimens and of the potential adsorption intensity of metals by the soils via sequential extraction. For the purposes of terminology, the natural soil and the chemically modified soils were named: natural soil (ST); soil ST treated with calcium (TCa); soil ST treated with sodium (TNa); and soil ST treated with hydrated lime (TCAL). A multispecies solution with the heavy metals lead, cadmium, manganese, nickel and zinc and the hydraulic gradients of 15, 45, 66 and 87 were used in the column percolation tests. Based on the testing data program, and for practical engineering purposes it was concluded that: (i) the equipment developed to perform the column percolation tests met the desired objectives; (ii) in comparison with the soil ST, the soil TCa and TNa presented significant changes in the Atterberg limits named LL and PL, depicting more plastic behavior, and increase in the maximum dry specific weight and drop in the optimum moisture content, as well as non-significant change in grain size distribution; (iii) in the TCAL soil, it was noted reduction of the soil fine fraction,

and non-significant change in the parameters optimum compaction parameters; (iv) changes in hydraulic gradient, regardless of the type of soil, did not produce significant variations in coefficient of hydraulic conductivity of soils; (v) regarding soils ST, TCa and TNa, hydraulic gradient variations reflected in different behaviors of soils heavy metals retention processes, revealing a trend of reduction of the retardation factor with reduction of the applied hydraulic gradient; however regarding the soil TCAL, it was not possible to calculate its retardation factor, since all metals were retained in the soil mass; (vi) from an engineering point of view, the tested soils showed no significant changes in their mechanical strength but the soil TCAL who presented major improvement based on data from unconfined compression, direct shear and quasi-static cone penetrometer tests, also presenting this soil more ductile mechanical behavior than the others; (vii) with regard to the results of the shrinkage tests, it was not detected significant change in comparison with soil ST; and (viii) taking up the soil ST as a reference, the soil TCAL was one that presented greater ability of heavy metal adsorption, since practically all the amount of multispecies solution was adsorbed on its mass; with respect to other soils, they showed similar behaviors, and sometimes even lower adsorption capacity than the soil ST.

---

**LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

Figura 2-1.	Localização do município onde foi coletada as amostras de solo em estudo neste trabalho de pesquisa. ....	10
Figura 2-2.	Vista frontal da jazida de coleta da amostra do solo. ....	10
Figura 2-3.	Fluxograma de rotinas desenvolvidas para realização da etapa de desenvolvimento do sistema de percolação em coluna. ....	16
Figura 2-4.	Esquema de funcionamento do equipamento, expondo as principais partes constituintes. ....	20
Figura 2-5.	Maquete que mostra uma visão geral do equipamento de percolação e sua disposição física. ....	21
Figura 2-6.	Painel de controle para aplicação de pressão de ar comprimido na interface. ....	22
Figura 2-7.	Reservatório de armazenamento do líquido percolante (interface). ....	22
Figura 2-8.	Permeâmetro onde será ensaiada a amostra. ....	23
Figura 2-9.	Grau de saturação do complexo de troca do solo com cálcio através da adição de teores de 0, 2, 3 e 4 % de cal hidratada. ...	26
Figura 2-10.	Curvas granulométricas dos solos ST, TCa, TNa e TCAL. ....	27
Figura 2-11.	Curvas de compactação dos solos ST, TCa, TNa e TCAL. ....	28
Figura 3-1.	Concentrações de metais pesados. ....	42
Figura 4-1.	Equipamento de percolação em coluna. ....	51
Figura 4-2.	Esquema de produção dos corpos de prova. ....	53
Figura 4-3.	Equipamento de ensaio penetrométrico: (i) à esquerda, penetrômetro com pistão, célula de carga e base de apoio do corpo de prova; (ii) ao centro, sistema hidráulico incluindo bomba hidráulica e válvula de controle de velocidade de cravação; e (iii) à direita, computador com sistema de aquisição de dados. ....	54
Figura 4-4.	Esquema de produção dos corpos de prova. ....	55
Figura 4-5.	Curvas tensão versus deslocamento lateral relativo. ....	57
Figura 4-6.	Envoltórias de ruptura para os solos estudados segundo ensaio de resistência ao cisalhamento direto. ....	58

---

Figura 4-7.	Curvas tensão deformação dos solos ST, TCa, TNa e CAL. ....	59
Figura 4-8.	Resistência de ponta versus profundidade nos ensaios realizados com o cone penetrométrico em corpos de prova dos solos ST, TCa, TNa e TCAL. ....	60
Figura 4-9.	Variação de diâmetro e altura do corpo de prova para o solo ST.	61
Figura 4-10.	Variação de diâmetro e altura do corpo de prova para o solo TCa. ....	62
Figura 4-11.	Variação de diâmetro e altura do corpo de prova para o solo TNa. ....	62
Figura 4-12.	Variação de diâmetro e altura do corpo de prova para o solo TCAL. ....	63
Figura 5-1.	Modelo de curva de retenção. ....	71
Figura 5-2.	Equipamento de percolação em coluna. ....	73
Figura 5-3.	Curvas de retenção para o solo ST contaminado com os metais pesados para quatro gradientes hidráulicos. ....	78
Figura 5-4.	Curvas de retenção para o solo TCa contaminado com metais pesados para quatro gradientes hidráulicos. ....	81
Figura 5-5.	Curvas de retenção para o solo TNa contaminado com metais pesados para quatro gradientes hidráulicos. ....	83
Figura 5-6.	Curvas de retenção para o solo TCAL contaminado com metais pesados para quatro gradientes hidráulicos. ....	86
Figura 5-7.	Coeficientes de condutividade hidráulica dos solos versus gradientes hidráulicos. ....	88
Figura 6-1.	Equipamento de percolação em coluna. ....	96
Figura 6-2.	Amostras de solos para ensaio de extração sequencial. ....	98
Figura 6-3.	Croqui esquemático do processo de extração sequencial modificado de Velten (2008). ....	99
Figura 6-4.	Valores de concentração referente às etapas da extração sequencial de amostras dos solos ST, TCa, TCAL e TNa, respectivamente, considerando-se o metal pesado Cd. ....	103
Figura 6-5.	Valores de concentração referente às etapas da extração sequencial de amostras dos solos ST, TCa, TCAL e TNa, respectivamente, considerando-se o metal pesado Mn. ....	104
Figura 6-6.	Valores de concentração referente às etapas da extração	

- 
- sequencial de amostras dos solos ST, TCa, TCAL e TNa, respectivamente, considerando-se o metal pesado Ni. .... 105
- Figura 6-7. Valores de concentração referente às etapas da extração sequencial de amostras dos solos ST, TCa, TCAL e TNa, respectivamente, considerando-se o metal pesado Pb. .... 106
- Figura 6-8. Valores de concentração referente às etapas da extração sequencial de amostras dos solos ST, TCa, TCAL e TNa, respectivamente, considerando-se o metal pesado Zn. .... 107

---

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2-1.	Especificações técnicas dos sais cloreto de cálcio e cloreto de sódio a serem utilizados no presente estudo (CANESCHI, 2008)	12
Tabela 2-2.	Cálculo do volume percolado em função do gradiente hidráulico e do tempo de percolação	24
Tabela 2-3.	Condutividade hidráulica	25
Tabela 2-4.	Resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos dos solos ST, TCa, TNa e TCAL	27
Tabela 2-5.	Parâmetros ótimos de compactação dos solos ST, TCa, TNa e TCAL	28
Tabela 2-6.	Propriedades químicas dos solos ST, TCa, TNa e TCAL	30
Tabela 3-1.	Valores das concentrações dos metais Cd, Mn, Ni, Pb e Zn com as respectivas fontes de consultas	41
Tabela 3-2.	Valores da concentração dos metais Cd, Mn, Ni, Pb e Zn	43
Tabela 3-3.	Concentração utilizada na elaboração da solução afluyente multiespécie	43
Tabela 4-1.	Parâmetros ótimos de compactação do solo ST, TCa, TNa e TCAL	56
Tabela 5-1.	Parâmetros ótimos de compactação do solo ST, TCa, TNa e TCAL	76
Tabela 5-2.	Análise de regressão e fator de retardamento das curvas de retenção dos metais para o solo ST	79
Tabela 5-3.	Análise de regressão e fator de retardamento das curvas de retenção dos metais para o solo TCa	82
Tabela 5-4.	Análise de regressão e fator de retardamento das curvas de retenção dos metais para o solo TNa	84
Tabela 5-5.	Análise estatística dos dados de coeficientes de condutividade hidráulica encontrados por solo considerando a variação do gradiente hidráulico	87
Tabela 6-1.	Parâmetros ótimos de compactação do solo ST, TCa, TNa e TCAL	100
Tabela 6-2.	Propriedades químicas dos solos ST, TCa, TNa e TCAL	101

---

**LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

AAS	Espectrofotometria de Absorção Atômica de Chama
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DPS	Departamento de Solos
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
LVA	Latossolo Vermelho-Amarelo
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
ST	Solo sem tratamento (LVA)
TCa	Solo tratado com cloreto de cálcio
TCAL	Solo tratado com cal hidratada CH III
TNa	Solo tratado com cloreto de sódio
UFV	Universidade Federal de Viçosa
USP	Universidade de São Paulo

---

**LISTA DE SÍMBOLOS**

$\tau$	Tempo necessário para se atingir 50% da curva do ensaio de coluna
$\gamma_{dmax}$	Massa específica aparente seca máxima
$\gamma_s$	Peso específico dos grãos
$\mu+\sigma$	Média mais desvio padrão de uma amostra de dados
C	Concentração de metal no efluente
$C_0$	concentração inicial do elemento
$C_t$	concentração de metal no efluente
e	Índices de vazios
i	gradiente hidráulico
$K_t$	constante de Thomas
$K_{YN}$	Constante
m	massa do adsorvente
Q	Vazão
$q_0$	máxima quantidade de elemento que pode ser absorvida pelo solo
r	Coeficiente de correlação
Sr	Grau de saturação
V	Volume acumulado de efluente
$V_v$	Volume de poros do corpo de prova
$W_{ot}$	Teor umidade ótimo
Z	Descrever o que significa o Z na estatística
$\varepsilon$	Deformação
$\sigma$	Tensão Normal
v	Volume de efluente



---

**SUMÁRIO**

<b>Capítulo 1. Introdução geral</b>	<b>1</b>
1.1 Generalidades .....	1
1.2 Objetivo.....	3
1.3 Organização do trabalho.....	4
<b>Capítulo 2. Produção dos solos modificados e caracterização geotécnica e química dos solos</b>	<b>7</b>
2.1 Introdução.....	8
2.2 Materiais .....	9
2.2.1 O solo.....	9
2.2.2 Cal hidratada (CaOH <sub>2</sub> ) .....	11
2.2.3 Cloreto de cálcio e cloreto de sódio .....	11
2.3 O equipamento .....	13
2.4 Métodos.....	14
2.4.1 Teste e validação do sistema de percolação em coluna .....	14
2.4.2 Produção dos solos modificados.....	17
2.4.3 Caracterização geotécnica.....	18
2.4.4 Caracterização química e eletroquímica do solo e dos solos modificados.....	19
2.5 Resultados.....	19
2.5.1 O equipamento.....	19
2.5.2 Fase de teste e validação .....	24
2.5.3 Percentuais ótimos dos agentes modificadores .....	25
2.5.4 Ensaios de caracterização geotécnica .....	26
2.5.5 Curvas de compactação.....	28
2.5.6 Ensaios de caracterização química.....	30
2.6 Conclusões .....	31
<b>Capítulo 3. Concentrações de metais pesados para produção de solução contaminante multiespécie</b>	<b>35</b>
3.1 Introdução.....	36
3.2 Métodos .....	39
3.3 Resultados.....	40
3.4 Conclusão.....	43

---

<b>Capítulo 4. Avaliação do comportamento mecânico de solos modificados</b>	<b>48</b>
4.1 Introdução.....	49
4.2 Materiais .....	50
4.2.1 Solo .....	50
4.2.2 Solução contaminante.....	51
4.2.3 Equipamento de percolação em coluna .....	51
4.3 Métodos.....	52
4.3.1 Ensaio de cisalhamento direto .....	52
4.3.2 Ensaio de compressão não confinada.....	53
4.3.3 Ensaio com o cone penetrométrico quase-estático.....	53
4.3.4 Ensaio de retração .....	54
4.4 Resultados e Discussões.....	56
4.4.1 Curvas de compactação.....	56
4.4.2 Ensaio de cisalhamento direto .....	56
4.4.3 Ensaio de compressão não confinada.....	59
4.4.4 Ensaio com o cone penetrométrico quase-estático.....	60
4.4.5 Ensaio de retração .....	61
4.5 Conclusões .....	64
<b>Capítulo 5. Influência do gradiente hidráulico na condutividade hidráulica e na retenção de metais pesados</b>	<b>68</b>
5.1 Introdução.....	69
5.2 Materiais .....	72
5.2.1 Solo .....	72
5.2.2 Solução contaminante.....	73
5.2.3 Equipamento de percolação em coluna .....	73
5.3 Métodos.....	74
5.3.1 Ensaio de percolação em coluna realizados sob gradientes hidráulicos diferentes.....	74
5.3.2 Ensaio de condutividade hidráulica .....	76
5.4 Resultados.....	76
5.4.1 Ensaio de compactação .....	76
5.4.2 Influência do gradiente hidráulico no processo de retenção de metais pesados.....	77
5.4.3 Influência do gradiente hidráulico no coeficiente de condutividade hidráulica.....	87
5.5 Conclusões .....	88

---

<b>Capítulo 6. Avaliação do potencial de adsorção dos solos para metais pesados</b>	<b>92</b>
6.1 Introdução.....	92
6.2 Materiais .....	95
6.2.1 Solo .....	95
6.2.2 Solução contaminante.....	95
6.2.3 Equipamento de percolação em coluna .....	96
6.3 Métodos.....	96
6.4 Resultados.....	100
6.4.1 Ensaio de compactação .....	100
6.4.2 Ensaio de caracterização química.....	101
6.4.3 Ensaio de extração sequencial.....	102
6.5 Conclusões .....	112
<b>Capítulo 7. Conclusão geral e sugestões para trabalhos futuros</b>	<b>114</b>
7.1 Conclusão geral.....	114
7.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	116

---

## CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO GERAL

### 1.1 GENERALIDADES

A população mundial enfrenta, a cada dia, o problema resultante do uso desordenado dos recursos naturais, que traz como consequência um enorme volume de material a ser descartado diariamente, ou seja, tudo aquilo que a sociedade classifica como economicamente inútil. Não apenas o tipo e o volume de materiais descartados são preocupantes, mas, também, as condições e o local de deposição dos mesmos no ambiente.

Uma vez colocado à exposição de forma inadequada, esses materiais ficam à mercê da ação do intemperismo e assim se degradam, gerando produtos poluentes (principalmente chorume e gás) do ar, da água e do solo. A contaminação de um desses três meios, em especial o solo, automaticamente polui os demais e, por consequência, pode afetar todos os seres que vivem nessas regiões e, também, aqueles que se utilizam de algum produto alimentício advindo dessas áreas, podendo provocar distúrbios em seus organismos.

Dentre os agentes poluidores do solo, enfatiza-se o chorume, caracterizado por ser um líquido escuro e de elevada carga orgânica, originado da decomposição química e microbiológica da fração orgânica e demais constituintes, como papel, metais, plásticos e vidros (NÓBREGA, *et al.*, 2009).

Pela grande variedade de metais presentes no lixo, a concentração de elementos traços no chorume, com destaque para Cd, Mn, Ni, Pb, Zn dentre outros, se faz relevante, uma vez que o acúmulo desses elementos no solo, o torna incapaz da prática do cultivo, pastagem dentre outras.

No entanto, ressalta-se que a espécie humana é a principal causadora desse desequilíbrio, mas da mesma forma que ela possui a capacidade de poluir, ela também possui a condição de buscar alternativas para remediar e/ou prevenir esses danos ao ambiente em que vive.

Devido à importância e amplitude do tema relacionado à contaminação ambiental, o presente trabalho concentra-se no estudo de soluções de

---

engenharia para obras de disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) e, em especial, no que tange à contaminação do solo por metais pesados.

Para tanto, órgãos ambientais atuam no sentido de fiscalizar a deposição e disposição de resíduos na natureza, normatizando condições mínimas de controle de destinação final, como é o caso do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Tais entidades trabalham no sentido de prevenção/intervenção, impedindo que o descarte de resíduos prejudiquem as condições naturais do ambiente no qual foi depositado. Dentre as resoluções destes órgãos que tratam do assunto, destacam-se as resoluções de nº 430 (CONAMA, 2011) e 404 (CONAMA, 2008) do CONAMA, outras do COPAM, bem como a NBR 8419 (ABNT, 1992).

Especificamente no caso da contaminação do solo por meio dos RSU, é comum trabalhar-se no sentido de envelopar o material descartado, caracterizando assim os aterros sanitários. Esse envelopamento é realizado pelo envolvimento dos RSU com solo compactado, ou por barreiras geossintéticas equivalentes (GCL, geomembrana). Entretanto, convencionalmente, sabe-se que esse procedimento conduz à degradação da matéria orgânica em meio anaeróbio que, por sua vez, produz gás e lixiviado conhecido como chorume. O gás, geralmente, é queimado nas saídas dos drenos verticais. Para não haver o acúmulo ou a sua percolação no subleito, o líquido é drenado e direcionado a um local de tratamento, até que atinja os padrões mínimos de lançamento estipulados pelos órgãos competentes e então seja descartado no ambiente.

Para confecção das células de acondicionamento dos RSU, os solos utilizados necessitam de características mínimas que satisfaçam às exigências de normas técnicas. Nesse sentido, as camadas de solo compactado funcionam como elementos estruturais do aterro sanitário e, além disso, são caracterizadas como barreiras impermeáveis por necessitarem de baixa condutividade hidráulica, sendo que as camadas de cobertura atuam, também, como elementos de proteção do lixo, no sentido de reduzir a infiltração de água superficial. Por outro lado, as camadas de fundo atuam no sentido de impedir

---

ao máximo a penetração do percolado no subsolo e, posteriormente, no corpo hídrico (AFONSO, 2005, p. 1). Tais barreiras são construídas por camadas de solo compactado de baixa condutividade hidráulica, membranas impermeáveis industrializadas (geossintéticos), dispositivos de drenagem e outros, de modo que o agente poluidor não contamine o ambiente.

Considerando os aspectos de contaminação do solo e de técnicas de engenharia abordados, o presente trabalho fixa o solo como o elemento de estudo e busca propor a criação de técnicas para a modificação do seu comportamento de engenharia, com vistas à sua aplicação em geotecnia ambiental.

## **1.2 OBJETIVO**

O presente trabalho teve por objetivo proceder à modificação da fração fina de um solo argiloso típico da região Sudeste do Brasil, especificamente da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, com vistas a aplicações em obras geotécnicas de caráter ambiental, considerando-se os seguintes aspectos:

- projetar e construir um equipamento de percolação para a realização de ensaios de percolação em coluna que oferecesse condições de reproduzir gradientes hidráulicos elevados, com o propósito de acelerar o processo de percolação;
- desenvolver processos de mudanças no complexo iônico do solo em estudo que não se restringissem apenas a investigações de laboratório, mas também a aplicações práticas de campo;
- comparar parâmetros físicos, químicos e geotécnicos do solo e dos solos modificados, bem como ensaios de retração, com o intuito de simular condições consideradas críticas no campo como longo tempo de exposição ao ar e ao sol;
- realizar ensaios de percolação em coluna de caráter preliminar para se avaliar a influência da carga hidráulica nas curvas de retenção de metais pesados no solo em estudo;

- 
- realizar ensaios de percolação em coluna, a fim de se avaliar a condutividade hidráulica e a capacidade de retenção dos metais pesados Cd, Mn, Ni, Pb, e Zn no solo e nos solos modificados;
  - avaliar a distribuição dos metais ao longo do corpo de prova, bem como a intensidade do potencial de adsorção dos metais no solo através de ensaios de extração sequencial; e
  - avaliar a resistência mecânica e a retração do solo e dos solos modificados após contaminação com os metais pesados em estudo, através da realização de ensaios geotécnicos de compressão não confinada, cisalhamento direto, retração e com o cone penetrométrico quase-estático.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Formalmente, esta tese engloba um total de sete capítulos, abrangendo os capítulos de 2 a 6 artigos científicos que têm ligações entre si, tanto na concepção como no desenvolvimento dos experimentos, e o capítulo 7 as conclusões e sugestões para trabalhos futuros, como segue:

- capítulo 2 - artigo em que se apresenta o solo residual maduro (Latossolo Vermelho-Amarelo - LVA) como material de estudo, os processos de produção dos solos modificados, a caracterização geotécnica e química deste solo e dos solos modificados, bem como o projeto e construção do equipamento para a realização dos ensaios de percolação;
- capítulo 3 - artigo em que se definem os metais pesados a serem empregados no estudo e suas respectivas concentrações para elaboração da solução multiespécie;
- capítulo 4 - artigo em que se avalia o comportamento mecânico do solo e dos solos modificados contaminados com a solução multiespécie dos metais pesados analisados, incluindo ensaios de

---

retração, cisalhamento direto, compressão não confinada e penetração com o cone penetrométrico quase-estático;

- capítulo 5 - artigo em que se analisa a influência do gradiente hidráulico nas curvas de retenção dos metais pesados no solo e nos solos modificados;
- capítulo 6 – artigo em que se aborda a avaliação do potencial de adsorção do solo e dos solos modificados para os metais pesados em estudo, bem como suas distribuições ao longo dos corpos de prova; e
- capítulo 7 – aborda-se neste capítulo a finalização desta pesquisa, com a apresentação das conclusões e recomendações para trabalhos futuros.



---

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AFONSO, T. P. **Condutividade hidráulica de solos compactados em ensaios com permeâmetro de parede flexível**. 2005. 120f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo EESC/USP. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

CONAMA. Resolução nº 404, 11 de novembro de 2008. Estabelece critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil** n. 144, 12 de nov. de 2008, Seção 1, p. 93.

CONAMA. Resolução nº 430, 16 de maio de 2011. Dispõe sobre condições e padrões de lançamentos de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil** n. 62, de 16 mai. 2011, Seção 1, p. 89-91.

NÓBREGA, M. R. R.; KOHN, L. G.; MILANI, I. C. B.; NEBEL, A. L. C.; TAVARES, V. E. Q.; SUZUKI, L. E. A. S.; COLLARES, G. L. Caracterização do chorume de um aterro controlado em Pelotas/RS In: XVIII Congresso de Iniciação Científica, o XI Encontro de Pós-Graduação e a I Mostra Científica - "EVOLUIR SEM EXTINGUIR: POR UMA CIÊNCIA DO DEVIR". Pelotas: [s.n.]. 2009. p. 4.

---

## CAPÍTULO 2. PRODUÇÃO DOS SOLOS MODIFICADOS E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E QUÍMICA DOS SOLOS

**Resumo:** Os objetivos deste trabalho foram: (i) projetar, construir e tornar operacional um equipamento para a realização de ensaios de percolação em coluna em amostras de solos compactadas diretamente nos moldes de ensaio (permeâmetros), com capacidade de ensaiar várias amostras simultaneamente com o emprego de gradientes hidráulicos distintos e realizar ensaios de condutividade hidráulica de solos finos; e (ii) desenvolver processos de produção de solos modificados a partir de um solo residual (solo ST), com o uso de cal hidratada e cloretos de cálcio e de sódio como agentes modificadores. Para a construção do equipamento foram utilizados materiais inertes que não interferissem em ensaios de percolação em coluna de solo como, nylon, PVC, acrílico e aço inox. Para a produção dos solos, foram adicionados 2% de cal hidratada e 1% de cloreto de cálcio e de cloreto de sódio em relação à massa seca do solo ST, resultando, respectivamente, nos solos TCAL, TCa e TNa. O equipamento mostrou-se confiável, atendendo aos objetivos para os quais foi projetado e fornecendo valores de coeficiente de condutividade hidráulica comparáveis com os obtidos com o emprego do equipamento de laboratório tradicional. Em relação ao solo ST e para fins práticos de engenharia verificou-se que: (i) os solos TCa e TNa apresentaram mudanças significativas nos limites de consistência, bem como nos parâmetros ótimos de compactação, notando-se redução do teor ótimo de umidade e aumento da massa específica aparente seca máxima, mas sem mudanças significativas na massa específica dos grãos e na distribuição granulométrica; (ii) o solo TCAL apresentou variação significativa nos limites de consistência e na fração fina da curva granulométrica, porém não se observando mudança expressiva nos parâmetros ótimos de compactação.

**Palavras-chave:** ensaios em coluna de solos, solos modificados, caracterização química e geotécnica de solos, condutividade hidráulica, aplicações ambientais.

---

## 2.1 INTRODUÇÃO

Sob a visão de busca de novas técnicas de tratamento dos solos para se atender necessidades específicas de engenharia, Fang (1997) considera que o complexo iônico pode controlar as propriedades geotécnicas dos solos. Nesse sentido, modificações químicas realizadas no complexo iônico desses materiais podem alterar significativamente os seus comportamentos de engenharia.

Segundo essa visão, Caneschi (2008) produziu novos solos por meio da adição do redutor químico ditionito de sódio e dos sais cloreto de cálcio e cloreto de sódio a um solo residual maduro, observando a ocorrência de alteração significativa da plasticidade e a perda de pigmentação, sendo este último fato atribuído à extração de óxidos de ferro do mesmo, ocasionada pela ação do ditionito de sódio. Esse autor notou, também, que a adição dos referidos produtos ampliou consideravelmente a capacidade de troca catiônica do solo. Tais mudanças ocorreram nos íons presentes nos minerais do solo, o que indica que o processo de modificação está intimamente ligado ao processo de troca iônica.

No processo de troca iônica, podem-se ordenar os principais cátions e ânions trocáveis encontrados nos solos, que são, respectivamente,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{SO}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  e  $(\text{NO}_3)^-$  (GRIM, 1968). Segundo Yong (2001), o processo de troca catiônica ocorre quando cátions presentes na solução de água nos poros do solo são atraídos para as partículas de argila. Na fase sólida dos solos estão os minerais silicatados de argila e também os colóides húmicos, que são os principais componentes dos solos que apresentam cargas elétricas negativas. São nessas partículas de argila que os cátions são atraídos eletrostaticamente, formando a dupla camada de cargas elétricas ou dupla camada difusa.

Assim, fenômenos ligados à adsorção iônica ocorrem levando em consideração aspectos qualitativos que, de acordo com Grim (1968), influenciam diretamente o processo de troca iônica, a saber: reversibilidade; estequiometria; independência da temperatura; velocidade; e tamanho da partícula.

---

Entretanto, além da produção de solos modificados, outro ponto de interesse, é a inovação em equipamentos de laboratório que permitam medir, por exemplo, a capacidade de retenção de metais pesados do solo (medida preventiva) e, ou avaliar técnicas de remediação de locais contaminados por metais pesados, hidrocarbonetos ou outras fontes, considerando-se ensaios que reflitam situações temporais de campo e os acelerados, analisando-se a qualidade técnica dos resultados destes últimos em relação àquela dos ensaios convencionais.

Assim, este artigo foi direcionado a: (i) produção dos solos modificados a partir do solo em estudo, bem como à caracterização geotécnica e química destes materiais; e (ii) desenvolvimento e operacionalização de um equipamento que atua como medidor simultâneo de condutividade hidráulica de vários corpos de prova de solo e que permite, simultaneamente, a realização de ensaios de percolação em coluna.

## **2.2 MATERIAIS**

### **2.2.1 O solo**

O solo é um residual maduro de gnaiss, classificado pedologicamente como Latossolo Vermelho-Amarelo e geotecnicamente como A-7-5 (Sistema TRB), CH (Sistema USC) e LG' (Metodologia MCT), de grande ocorrência no território brasileiro, sobretudo na Zona da Mata Norte de Minas Gerais, e aqui denominado solo ST.

A amostra, de textura argilo-areno-siltosa, foi coletada na microrregião da cidade de Viçosa, Zona da Mata Norte do estado de Minas Gerais, Brasil, em um talude de corte da rodovia MG-280, que liga as cidades de Viçosa e Paula Cândido, na entrada da Área de Eventos da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Para melhor localização, a Figura 2-1 ilustra geograficamente o local.

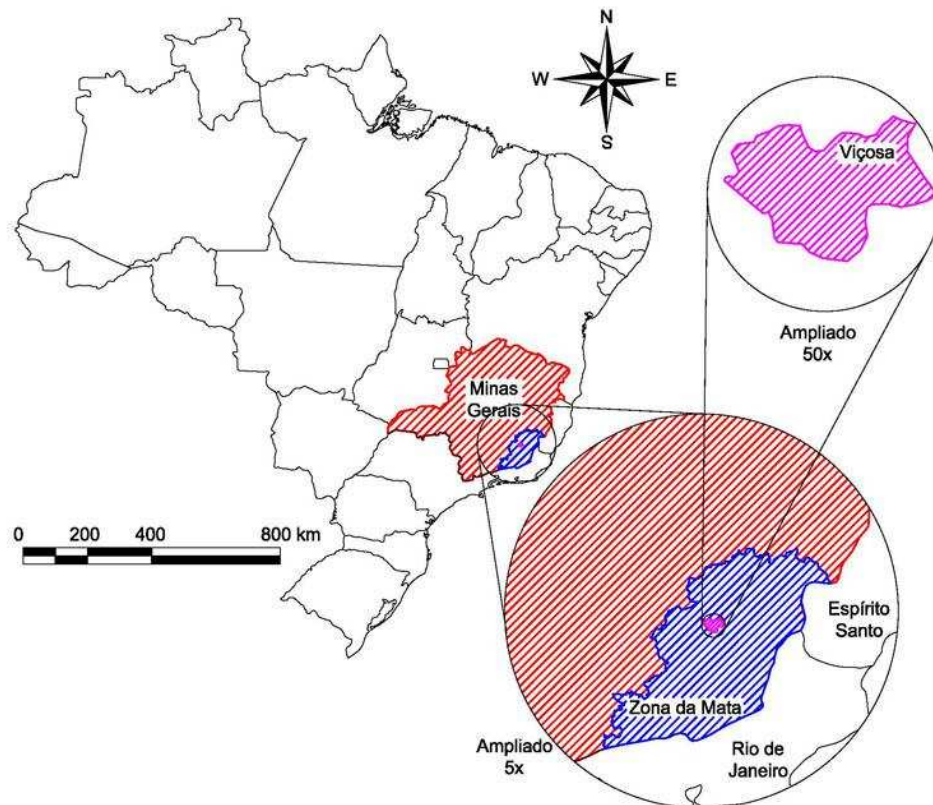


Figura 2-1. Localização do município onde foi coletada as amostras de solo em estudo neste trabalho de pesquisa.

A Figura 2-2, de modo complementar às Figura 2-1, mostra imagens locais do talude onde foi coletada a amostra de solo. Por ela também é possível observar que o talude ressalta características típicas desse solo, como a formação em locais com geometria côncava, a homogeneidade ao longo do perfil, e a grande profundidade do horizonte B.



Figura 2-2. Vista frontal da jazida de coleta da amostra do solo.

---

### **2.2.2 Cal hidratada (CaOH<sub>2</sub>)**

Esse é um material de uso corriqueiro na construção de bases de pavimentos rodoviários, aterros, pátios de estocagem, dentre outras aplicações de engenharia. O produto resultante da mistura de solo e cal hidratada é comumente conhecido como “solo-cal” ou “solo melhorado com cal”.

A cal hidratada utilizada nesse trabalho é um produto comercial, do tipo CH III, da marca Supercal. Como principais características, têm-se: cor branca e textura extremamente fina; inodora; pulverulenta; e reage, em especial, com a fração argila do solo em presença de água.

### **2.2.3 Cloreto de cálcio e cloreto de sódio**

Para a realização das modificações no complexo de troca do solo, utilizou-se os sais cloreto de cálcio e cloreto de sódio, comercializados pela empresa VETEC Ltda, que apresentam as especificações técnicas da Tabela 2-1.

Em especial, optou-se por trabalhar com esses sais pelo fato de os íons sódio e cálcio apresentarem valências distintas, que caracteriza comportamentos opostos quando interagem quimicamente com o solo, com a tendência de o primeiro assumir comportamento dispersante e o segundo floculante (LAMBE e WHITMAN, 1969).

Tabela 2-1. Especificações técnicas dos sais cloreto de cálcio e cloreto de sódio a serem utilizados no presente estudo (CANESCHI, 2008)

<b>Cloreto de Cálcio P.A. Dihidratado</b>	<b>Garantia do Produto</b>	Fórmula molecular	CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O
		Peso molecular	147,01 g
		Teor (Como CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O)	99,0 - 105,0%
		pH (Sol 5% a 25 °C)	4,5 - 8,5
		Materiais Insolúveis	Máx. 0,01%
		Subst. oxidantes (Como NO <sub>3</sub> )	Máx. 0,003%
		Sulfato (SO <sub>4</sub> )	Máx. 0,01%
		Amônio (NH <sub>4</sub> )	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>	<b>Garantia do Produto</b>	Fórmula molecular	NaCl
		Peso molecular	58,44 g
		Teor	Mín. 99%
		pH (Sol. 5% a 25 °C)	5,0 - 9,0
		Insolúveis em H <sub>2</sub> O	Máx. 0,005%
		Iodeto (I)	Máx. 0,002%
		Brometo (Br)	Máx. 0,01%
		Clorato e Nitrato (Como NO <sub>3</sub> )	Máx. 0,003%
		Compostos Nitrogenos (Como N)	Máx. 0,001%
		Fosfato (PO <sub>4</sub> )	Máx. 5 ppm
		Sulfato (SO <sub>4</sub> )	Máx. 0,004%
		Bário (Ba)	Máx. 0,001%
		Ppt Ca, Mg e R2O3	Máx. 0,005%
		Metais Pesados (Como Pb)	Máx. 5 ppm
		Ferro (Fe)	Máx. 2 ppm
		Potássio (K)	Máx. 0,01%

---

## 2.3 O EQUIPAMENTO

Na concepção do sistema desenvolvido para a realização dos ensaios de percolação em coluna, foram considerados aspectos gerais de funcionamento do sistema desenvolvido no Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos-USP por Leite et al. (1998) e, também, utilizado por Pacheco e Silva (2005).

Para a construção do sistema de percolação em coluna foram utilizados: (i) tubos de PVC com 100 mm de diâmetro interno e parede de 7 mm, para a confecção do compartimento para acondicionamento dos corpos de prova; (ii) discos de nylon para fabricação das tampas e fundos das células de interface e dos permeômetros de PVC; (iii) tubos de acrílico, também com 100 mm de diâmetro interno e parede de 7 mm, para o corpo das células de interface; (iv) tubos flexíveis, de ¼” para interligação dos compartimentos; (v) regulador de pressão na faixa de 0 a 200 kPa; (vi) manômetro para medição de pressão na faixa desejada; (vii) conexões em aço inox com detalhes em plástico; e (viii) latão para construção de demais acessórios específicos.

Cabe ressaltar que se optou por utilizar materiais como nylon, PVC e acrílico como elementos de contato com o líquido percolante, por exemplo, solução de sais de metal pesado, de modo a se evitar interferência do equipamento nos resultados dos ensaios de percolação em coluna realizados nos solos.

No projeto do sistema de percolação em coluna, foram consideradas as seguintes condições de contorno: (i) sistema de percolação de carga constante com capacidade para ensaio simultâneo de até 36 corpos de prova; (ii) gradiente hidráulico máximo de 170; e (iii) compartimentos independentes para acondicionamento do fluido de percolação e corpo de prova.

O desenvolvimento do sistema de percolação em coluna teve seus fundamentos alicerçados nos sistemas convencionais de percolação empregados nos ensaios de laboratório para a determinação da condutividade hidráulica, ou seja, o recomendado pela NBR 14545 (ABNT, 2000) e pela NBR 13292 (ABNT, 1995), e englobou quatro etapas, como segue: (i) inventário; (ii) projeto básico; (iii) construção do sistema; e (iv) teste do sistema.



---

A fase de inventário englobou a coleta de informações, de modo a se estabelecer o conjunto de premissas básicas para o funcionamento adequado do sistema, como segue: (i) necessidade de um reservatório para armazenamento do fluido de percolação, aqui referido por interface, com capacidade que demande o menor número possível de recargas; (ii) necessidade de se manter o gradiente hidráulico constante durante a fase de percolação, via sistema de ar comprimido; (iii) sistema de medição (determinação do coeficiente de condutividade hidráulica) e coleta do percolado (para análise da concentração de metais pesados); e (iv) uso de ranhuras nas paredes, em dois planos horizontais, como dispositivo para impedir fluxo preferencial no compartimento de acondicionamento da amostra de solo (corpo de prova).

Na etapa de projeto básico considerou-se o grupo de premissas básicas estabelecidas na fase de inventário e procedeu-se ao detalhamento de cada unidade que compõe o sistema de percolação em coluna; e produção de maquete virtual do sistema.

Em seguida iniciou-se a fase de construção do sistema, sendo os trabalhos realizados em uma oficina de tornearia, na cidade de Ubá, sob a supervisão da equipe técnica da UFV. Após montagem, o sistema foi transportado para o Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UFV, sendo instalado em uma sala com temperatura controlada.

## **2.4 MÉTODOS**

### **2.4.1 Teste e validação do sistema de percolação em coluna**

Considerando que o sistema de percolação em coluna desenvolvido no presente trabalho se baseou em princípios de sistemas convencionais de percolação empregados nos ensaios de laboratório para a determinação da condutividade hidráulica, a sua validação abrangeu a determinação da condutividade hidráulica do solo ST, comparando-se o desempenho do sistema projetado em relação ao procedimento tradicional de laboratório.

---

Para isso, foram moldados 18 corpos de prova nos parâmetros ótimos de compactação do solo ST, na energia do ensaio Proctor normal. Após a compactação dos corpos de prova, 9 foram posicionados no sistema de percolação em coluna (já dentro dos moldes de PVC), aplicando-se uma pressão de 100 kPa na célula de interface, que resulta em um gradiente hidráulico de 87. Destaca-se que esse valor se enquadra no limite superior da faixa de pressões representativas de barreiras selantes de aterros sanitários, segundo Pacheco e Silva (2005). Em seguida, adicionou-se água destilada à célula de interface, seguido da pressurização do sistema, sendo que ao se verificar a estabilização das leituras de volume percolado, determinou-se a condutividade hidráulica segundo procedimento recomendado pela NBR 13292 (ABNT, 1995), adotando-se como condutividade hidráulica do solo a média dos resultados obtidos. Quanto aos ensaios convencionais, que dizem respeito aos ensaios de condutividade hidráulica a carga variável, estes seguiram as recomendações da NBR 14545 (ABNT, 2000), determinando-se a condutividade hidráulica do solo como a média das condutividades hidráulicas obtidas. Por último, realizou-se a comparação dos resultados obtidos segundo os dois procedimentos empregados, de modo a se avaliar o desempenho do sistema de percolação via ar comprimido, que foi utilizado nos ensaios de percolação em coluna. De modo esquemático, apresenta-se na Figura 2-3 a metodologia aplicada nessa etapa do presente trabalho.

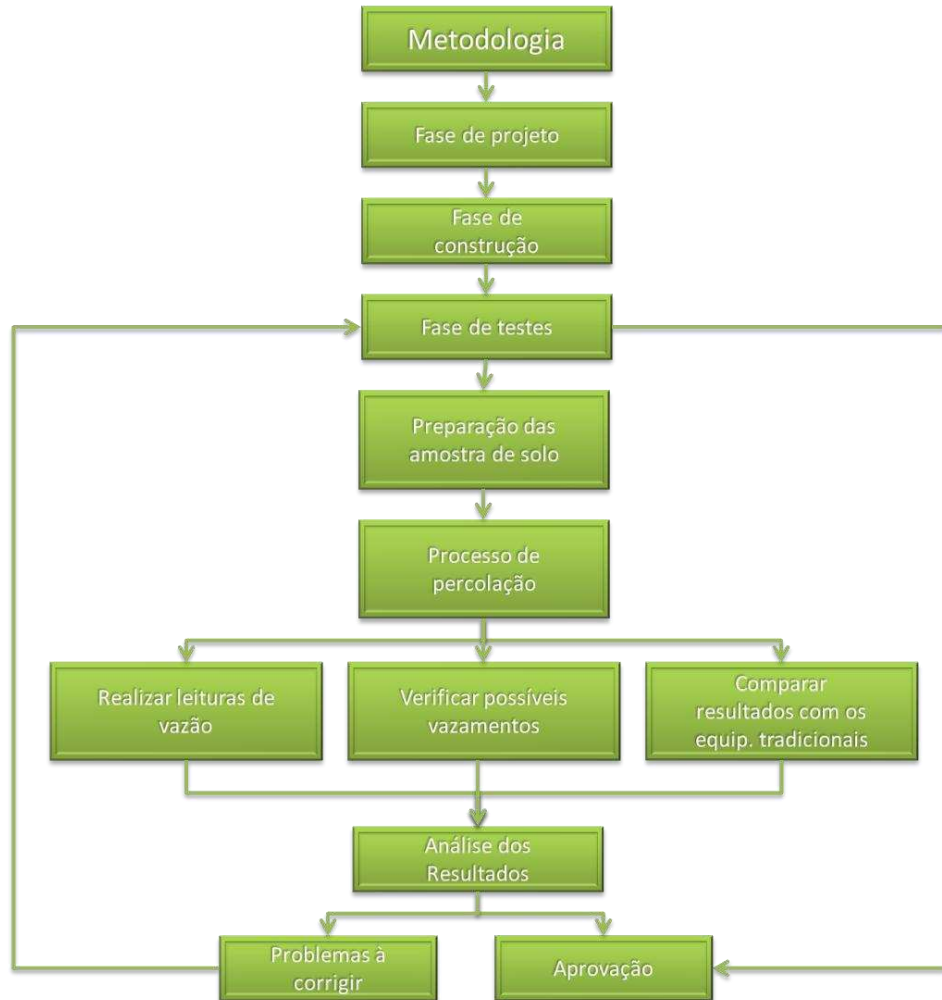


Figura 2-3. Fluxograma de rotinas desenvolvidas para realização da etapa de desenvolvimento do sistema de percolação em coluna.

Segundo a concepção de projeto do sistema, o reservatório superior (interface) deveria ser projetado para que fosse mínimo o número de recargas no decorrer de um ensaio de longa duração. Assim, realizou-se uma simulação, por meio de planilha eletrônica, para se determinar o volume do recipiente de armazenamento do percolado, de modo a se ter o menor número possível de recargas durante a realização deste tipo de ensaio, adotando-se valores de gradiente de 17, 33, 67 e 133, bem como os tempos de percolação de 10, 20 e 30 dias. Nesse caso, os volumes foram determinados a partir do conhecimento do coeficiente de condutividade hidráulica do solo ST e dos gradientes hidráulicos e tempos de ensaios adotados.

---

## 2.4.2 Produção dos solos modificados

Por razões de natureza técnico-econômica, buscou-se trabalhar com quantitativos mínimos de cal hidratada e dos cloretos de cálcio e sódio para a produção dos solos modificados.

Na compactação dos corpos de prova do solo ST e dos solos modificados, empregou-se a energia do ensaio Proctor normal.

### 2.4.2.1 Solo com cal hidratada

Na determinação do teor ótimo de cal hidratada, empregou-se metodologia semelhante àquela adotada por Caneschi (2008), avaliando-se o efeito da saturação do complexo de troca do solo estudado com os íons  $\text{Ca}^{2+}$  por meio de adição de cal hidratada a uma amostra do solo ST seca ao ar, destorroada e passada através da peneira com abertura nominal de 2 mm.

Posteriormente, a amostra de solo foi dividida em quatro frações com aproximadamente 250 g cada, adicionando-se a cada uma, respectivamente, os quantitativos de 0%, 2%, 3% e 4% de cal hidratada em relação à massa de solo seco. Considerando-se possíveis aplicações práticas, no presente estudo não se considerou o emprego de teores de cal inferiores a 2%, devido à dificuldade de homogeneização da mistura no campo. Em seguida, as misturas foram homogeneizadas, adicionando-se às mesmas as massas de água necessárias para que atingissem as umidades ótimas pré-determinadas. Consecutivo a esta etapa, manteve-se o conjunto de amostras em incubação em câmara úmida por um período de 7 dias em embalagens plásticas fechadas, de modo a favorecer a ocorrência de reações de troca iônica, mantendo-se a mesma padronização empregada nas misturas solo ST e sais adotada por Caneschi (2008).

Findo o período de incubação, as misturas de solo foram secas ao ar e, em seguida, realizaram-se as análises químicas para a determinação dos quantitativos de íons  $\text{Ca}^{2+}$  presentes nos seus respectivos complexos de troca iônica. De posse dos resultados das análises químicas, foram determinados os índices de saturação de cálcio das misturas, partindo-se da premissa que o

---

teor ótimo de cal hidratada para produzir o solo modificado seria o menor capaz de elevar o índice de saturação do complexo de troca com  $\text{Ca}^{2+}$  a um valor superior a 95%. A fim de nomenclatura, esse solo modificado foi denominado solo TCAL.

#### 2.4.2.2 Solo com cloreto de sódio e com cloreto de cálcio

A produção dos solos modificados se deu através da adição dos sais cloreto de cálcio e cloreto de sódio, empregando-se os mesmos quantitativos determinados previamente por Caneschi (2008) para o solo ST, ou seja, 1% de sal em relação à massa de solo seco. Para obtenção desse valor, Caneschi (2008) utilizou os mesmos procedimentos empregados no item anterior, variando apenas os percentuais de sais, com o uso dos teores de 0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, 4% e 8%. Os novos produtos, aqui produzidos, foram denominados solo TCa e solo TNa.

#### 2.4.3 Caracterização geotécnica

Foram realizados ensaios geotécnicos de caracterização e de compactação nos solos em estudo.

A caracterização geotécnica englobou os ensaios de granulometria NBR 7181 (ABNT, 1984d), massa específica dos grãos NBR 6508 (ABNT, 1984b), limite de liquidez NBR 6459 (ABNT, 1984a) e limite de plasticidade NBR 7180 (ABNT, 1984c).

Os ensaios de compactação foram realizados segundo recomendações da NBR 7182 (ABNT, 1986). Os corpos de prova foram moldados via compactação por processo dinâmico, utilizando-se o molde do ensaio de compactação Proctor, com 10,0 cm de diâmetro e 12,7 cm de altura, empregando-se a energia do ensaio Proctor normal. Assim foram determinadas as curvas de compactação do solo e dos solos modificados e os respectivos parâmetros ótimos de compactação [massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_{dmax}$ ) e umidade ótima ( $W_{ot}$ )].

---

#### 2.4.4 Caracterização química e eletroquímica do solo e dos solos modificados

A caracterização do complexo sortivo dos solos foi realizada segundo os procedimentos preconizados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1997). Os cátions trocáveis  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  foram extraídos em  $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$  e determinados seus quantitativos por espectrometria de absorção atômica. O cátion  $\text{Al}^{3+}$ , extraído por  $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$ , foi determinado volumetricamente por titulação com  $\text{NaOH } 0,025 \text{ mol L}^{-1}$ . A acidez potencial ( $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ) foi determinada via extração com acetato de cálcio  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  a pH 7,0 e posterior titulação com  $\text{NaOH}$ . Os cátions  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  foram extraídos por extrator Mehlich-1 e determinados seus quantitativos por fotometria de chama. A partir dos resultados destas análises, foi possível determinar: (i) a soma das bases trocáveis (SB):  $\text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ; (ii) a capacidade de troca de cátions (CTC):  $\text{SB} + (\text{H}^+ + \text{Al}^{3+})$ ; e (iii) a saturação por bases (V%):  $(\text{SB}/\text{CTC}) \times 100$ .

### 2.5 RESULTADOS

#### 2.5.1 O equipamento

A Figura 2-4 apresenta um fluxograma de funcionamento do sistema de percolação em coluna e a Figura 2-5 ilustra partes do sistema, incluindo o painel de controle da pressão de ar comprimido, o conjunto de permeômetros com respectivas interfaces e os tubos comunicantes.

O painel de controle foi fixado à parede próximo ao ponto de abastecimento de ar comprimido, ao passo que o conjunto de permeômetros e respectivas interfaces foram posicionados sobre um suporte do tipo prateleira, de modo a estarem aptos à execução dos ensaios com as interfaces dispostas na parte superior e as amostras e/ou permeômetros dispostos na parte inferior.

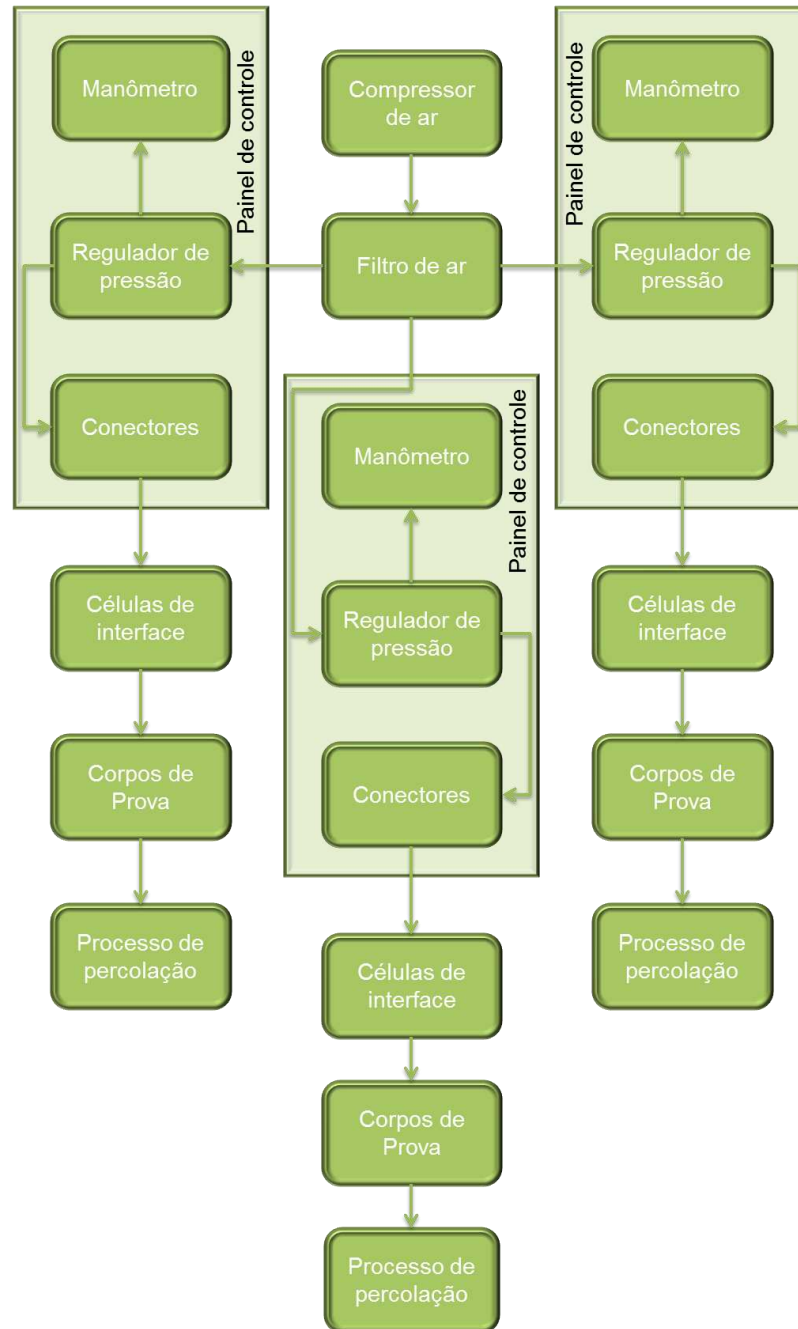


Figura 2-4. Esquema de funcionamento do equipamento, expondo as principais partes constituintes.

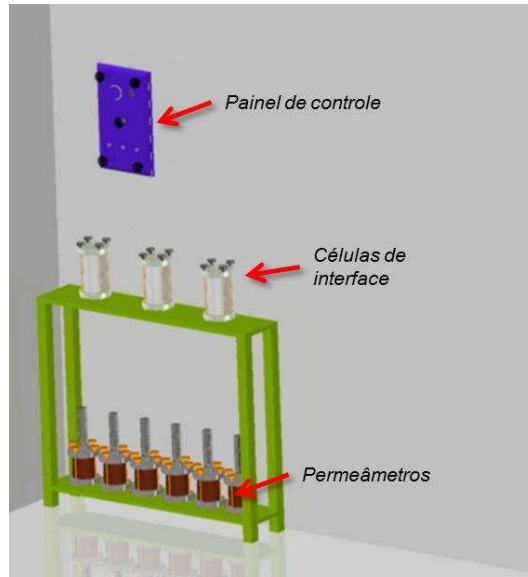


Figura 2-5. Maquete que mostra uma visão geral do equipamento de percolação e sua disposição física.

O painel de controle, conforme ilustra a Figura 2-6, é composto de: (i) um ponto de entrada de ar comprimido; (ii) um regulador de pressão; (iii) três pontos de saídas de ar comprimido e (iv) um manômetro. A entrada de ar recebe o ar da tubulação geral de ar comprimido que abastece o prédio do LEC da UFV, passando por uma válvula, e segue diretamente para o regulador de pressão, que se encontra no centro geométrico do quadro. A partir do regulador de pressão, saem quatro tubos flexíveis, sendo três deles para os pontos de pressurização das interfaces e o último em direção ao manômetro, para verificação da pressão aplicada.



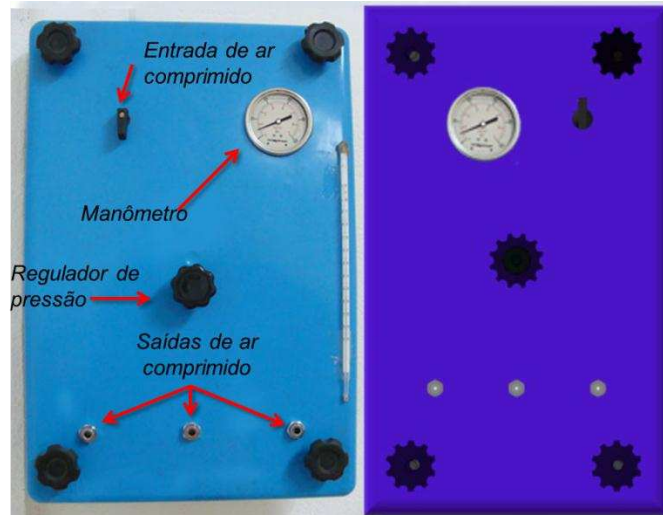


Figura 2-6. Painel de controle para aplicação de pressão de ar comprimido na interface.

Os três pontos de saída do painel de controle são compostos por conexões do tipo engate-rápido, que permitem a comunicação com as interfaces através de tubos flexíveis. A interface, como mostra a Figura 2-7, é composta basicamente por duas tampas (uma superior e outra inferior), um tubo de acrílico e um dispositivo que permite despressurizar o reservatório, em caso de necessidade, e respectivas conexões. Ressalta-se que todas as vedações foram feitas por intermédio de anéis O-ring.

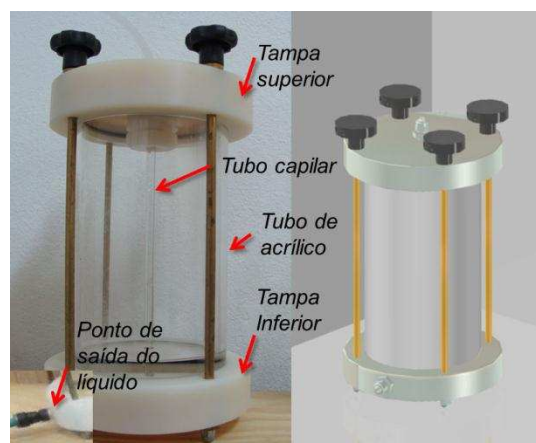


Figura 2-7. Reservatório de armazenamento do líquido percolante (interface).

A alimentação da célula de interface por ar comprimido é feita pela parte superior, por um dispositivo em que o ar caminha por um tubo capilar que se estende até às proximidades da base da célula, distando dela aproximadamente 1,5 cm, onde a bolha de ar emerge e põe o sistema em

carga. Esse dispositivo foi adotado para se garantir a aplicação de um gradiente hidráulico constante durante o período de ensaio. Na parte inferior, encontra-se o ponto de saída do líquido, que caminha pelo tubo em direção ao permeâmetro, como se ilustra na Figura 2-7.

O permeâmetro exposto na Figura 2-8 é constituído por duas tampas, uma superior e outra inferior (semelhantemente à interface) e por um tubo de PVC, onde se coloca o corpo de prova. A alimentação se dá na parte inferior, sendo que a coleta do líquido percolado acontece na parte superior, onde todo o efluente fica armazenado em tubos de vidros graduados milimetricamente, sendo posteriormente retirado com auxílio de uma pipeta graduada. Da mesma forma que a interface, o permeâmetro possui um dispositivo na tampa superior que permite a retirada do excesso de ar, aqui denominado de purgador. Nos permeâmetros, as tampas possuem canalículos na parte interna, com a finalidade de distribuir mais uniformemente possível o fluxo, e o corpo possui duas ranhuras ou sulcos internos, com o intuito de impedir a ocorrência de fluxo preferencial. De igual maneira que a interface, nas vedações dos permeâmetros empregam-se anéis O-ring.

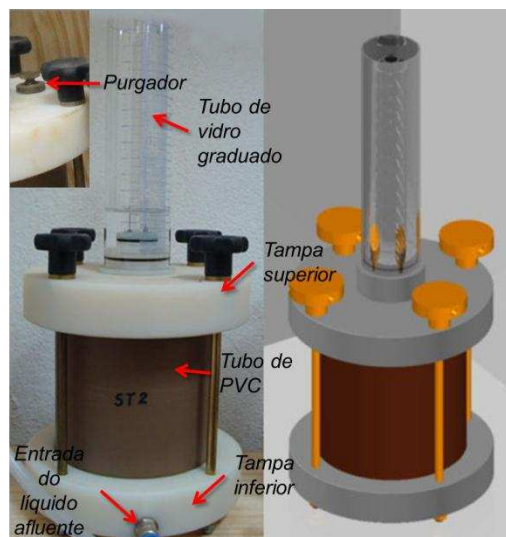


Figura 2-8. Permeâmetro onde será ensaiada a amostra.

Cabe lembrar que como o sistema é pressurizado, as partes acima e abaixo do corpo do permeâmetro são fixadas por meio de hastes que impedem

a movimentação relativa das peças, sendo que o mesmo sistema de fixação foi utilizado nas interfaces.

A Tabela 2-2 apresenta a simulação por meio de planilha eletrônica os dados de vazão e volume percolado de acordo com a variação do gradiente hidráulico e tempo de recarga.

Tabela 2-2. Cálculo do volume percolado em função do gradiente hidráulico e do tempo de percolação

Gradiente hidráulico	Tempo (dias)	Vazão ( $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ )	Volume percolado (L)
17	10	$1,34 \cdot 10^{-4}$	0,115
	20		0,231
	30		0,346
33	10	$2,59 \cdot 10^{-4}$	0,224
	20		0,448
	30		0,672
67	10	$5,26 \cdot 10^{-4}$	0,455
	20		0,909
	30		1,364
133	10	$10,4 \cdot 10^{-4}$	0,903
	20		1,805
	30		2,708

Analisando-se os valores calculados, conclui-se que um volume aproximado de 2 L atende ao critério estabelecido e, por detalhes construtivos, decidiu-se empregar um reservatório com um volume de armazenamento de aproximadamente 1,7 L. Assim, para os gradientes apresentados, a recarga da interface acontece, aproximadamente, a cada duas semanas.

Quanto ao compartimento inferior, adotaram-se as dimensões do cilindro utilizado para realização do ensaio de compactação Proctor normal. Dessa forma, pode-se compactar o corpo de prova no próprio molde, evitando-se consumo exagerado de bentonita e mão-de-obra, que são comuns nos ensaios realizados com permeômetros convencionais.

### 2.5.2 Fase de teste e validação

A Tabela 2-3 apresenta a análise estatística dos resultados dos ensaios de condutividade hidráulica dos corpos de prova ensaiados no permeômetro convencional e no sistema de percolação em coluna. As médias dos

coeficientes de condutividade hidráulica determinados com o emprego do sistema de percolação em coluna e com o sistema tradicional foram, respectivamente,  $4,83.10^{-8} \text{ cm s}^{-1}$  e  $9,50.10^{-8} \text{ cm s}^{-1}$ . Para fins práticos de engenharia, essa variação pode ser considerada desprezível, em especial considerando-se os desvios padrões observados, os valores determinados nos intervalos para grau de confiança de 95%, bem como que se trabalhou com o limite superior de pressões representativas de situações de campo que ocorrem em barreiras selantes de aterros sanitários, validando-se o uso do equipamento de percolação em coluna para a realização de ensaios de condutividade hidráulica.

Tabela 2-3. Condutividade hidráulica

Permeâmetro	Confiança -95%	Confiança +95%	Média ( $\text{cm s}^{-1}$ )	Mínimo ( $\text{cm s}^{-1}$ )	Máximo ( $\text{cm s}^{-1}$ )	Desvio padrão ( $\text{cm s}^{-1}$ )
Convencional	$8,60.10^{-8}$	$1,04.10^{-7}$	$9,50.10^{-8}$	$4,40.10^{-8}$	$3,22.10^{-7}$	$3,93.10^{-8}$
Proposto	$4,66.10^{-8}$	$5,00.10^{-8}$	$4,83.10^{-8}$	$-7,17.10^{-9}$	$1,07.10^{-7}$	$1,59.10^{-8}$

### 2.5.3 Percentuais ótimos dos agentes modificadores

O percentual ótimo dos sais cloreto de cálcio e de cloreto de sódio que foi capaz de elevar os índices de saturação do complexo de troca com  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Na}^+$  a valores superiores a 95% foi de 1% em relação à massa de solo seco, segundo determinação de Caneschi (2008).

Prosseguindo, na Figura 2-9 apresentam-se os resultados referentes ao estudo da variação do grau de saturação do complexo de troca do solo com íons  $\text{Ca}^{2+}$ , em função da variação do percentual de cal hidratada na faixa de 0% a 4% em relação à massa de solo seco.

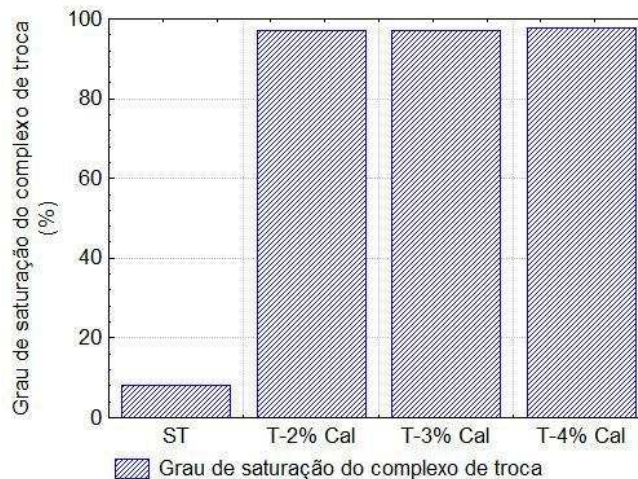


Figura 2-9. Grau de saturação do complexo de troca do solo com cálcio através da adição de teores de 0, 2, 3 e 4 % de cal hidratada.

Da análise dos resultados apresentados na Figura 2-9, conclui-se que a adição de 2% de cal hidratada ao solo foi suficiente para promover a saturação do seu complexo de troca com íons  $\text{Ca}^{2+}$  em nível superior a 95%, estabelecendo-se, assim, este valor como o teor ótimo de cal hidratada, ou seja, como a melhor opção técnica e econômica para aplicação nesse trabalho.

#### 2.5.4 Ensaios de caracterização geotécnica

A Figura 2-10 apresenta os resultados dos ensaios de granulometria e a Tabela 2-4 complementa com os resultados dos ensaios de massa específica dos grãos e dos limites de consistência dos solos ST, TCa, TNa e TCAL.

Após análise das curvas de distribuição granulométrica dos solos estudados, Figura 2-10, para fins práticos de engenharia, observa-se que não houve variação significativa na distribuição granulométrica dos solos, para diâmetros maiores do que 0,07 mm. Para diâmetros menores, em especial aqueles inferiores 0,06 mm, ocorreram diferenças granulométricas significativas, particularmente no solo TCAL. Nesse solo, a adição de cal hidratada promoveu a ocorrência de trocas catiônicas entre íons do solo e íons  $\text{Ca}^{2+}$  provenientes do aglomerante, que levaram à floculação de partículas da sua fração argila, em geral, devido a mecanismos de redução de suas duplas camadas difusas. Possivelmente esse fenômeno esteja ligado com o fato de a cal hidratada ser um aglomerante aéreo.

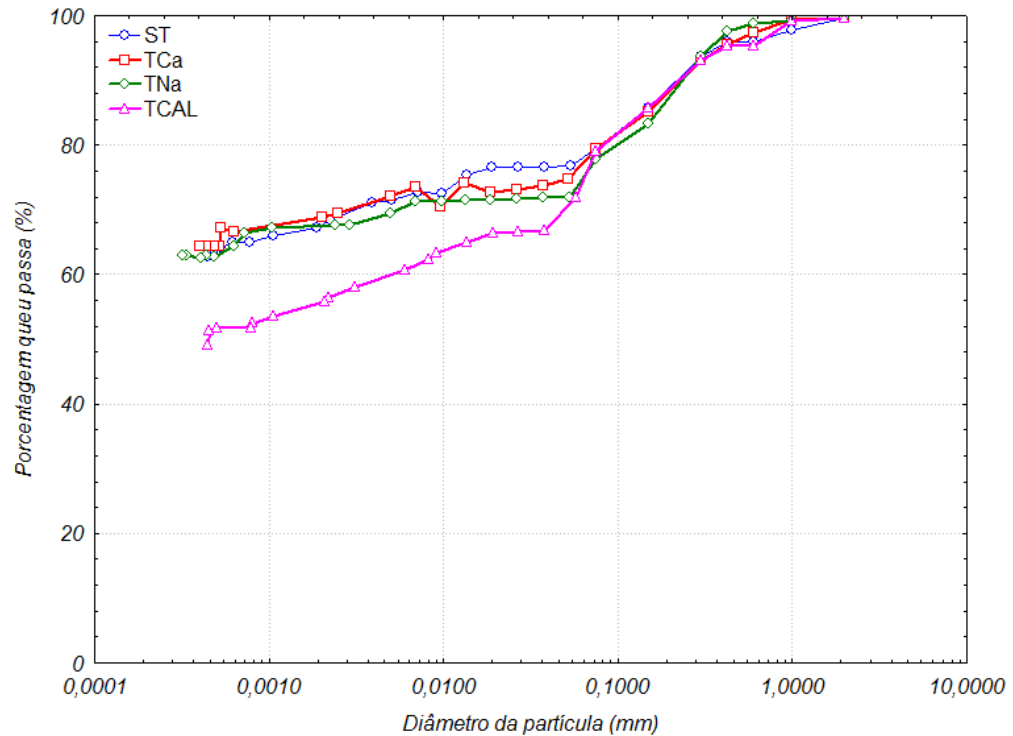


Figura 2-10. Curvas granulométricas dos solos ST, TCa, TNa e TCAL.

Tabela 2-4. Resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos dos solos ST, TCa, TNa e TCAL

Tratamento	Limites de Atterberg			$\gamma_s$ (g cm <sup>-3</sup> )	Granulometria		
	LL (%)	LP (%)	IP (%)		Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
ST	82	46	36	2,78	22,8	9,9	67,3
TCa	68	36	32	2,81	23,5	7,7	68,8
TNa	68	39	29	2,80	27,5	5,2	67,3
TCAL	64	41	23	2,78	27,5	16,8	55,7

Com relação aos dados apresentados na

Tabela 2-4, observa-se a ocorrência de reduções de pequena monta na massa específica dos sólidos e de reduções significativas no LL e, em menor escala, no LP, que redundaram em quedas no IP dos solos modificados, em especial no solo TCAL. Os dados de granulometria reforçam a observação apresentada com relação à Figura 2-10 para esse solo, notando-se que os mecanismos de floculação produziram aumentos nos quantitativos das frações areia e silte, como esperado, com a conseqüente redução do percentual da fração argila do solo.

## 2.5.5 Curvas de compactação

Os resultados dos ensaios de compactação encontram-se apresentados na Figura 2-11 e na Tabela 2-5, que traz, também, dados adicionais, como índice de vazios e grau de saturação para os pontos ótimos das curvas de compactação.

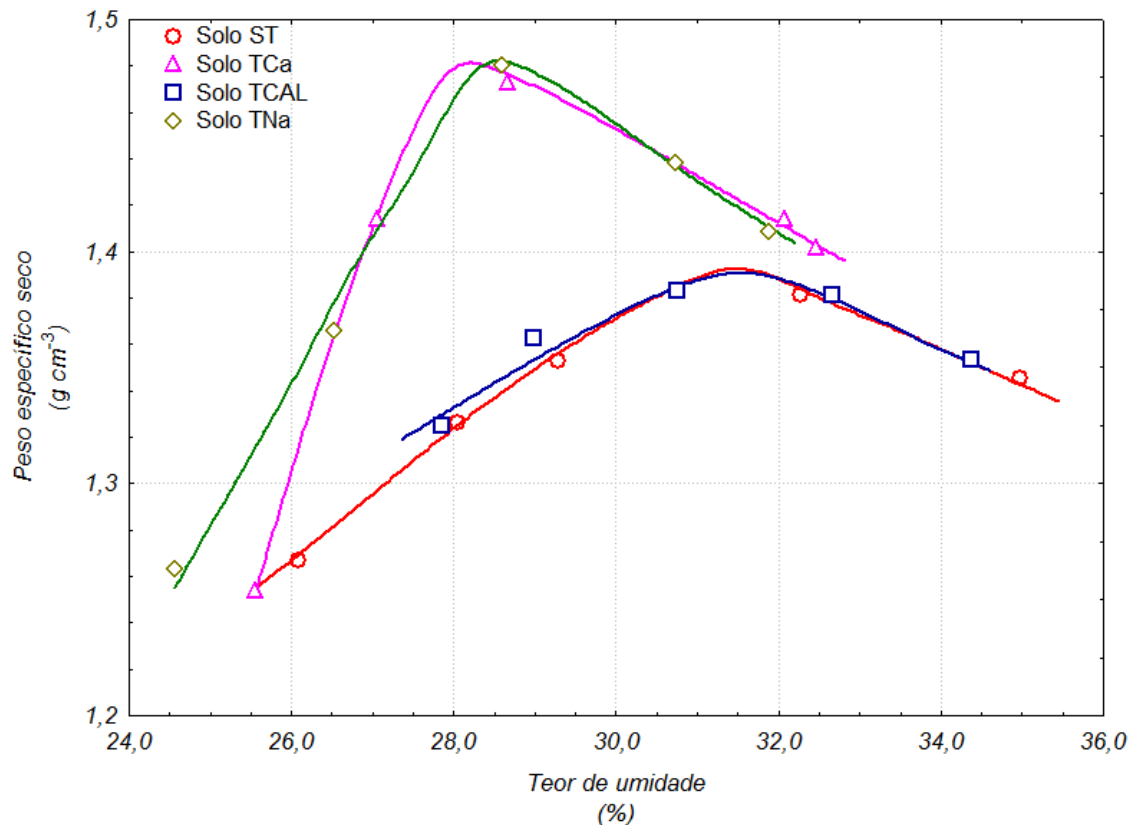


Figura 2-11. Curvas de compactação dos solos ST, TCa, TNa e TCAL.

Tabela 2-5. Parâmetros ótimos de compactação dos solos ST, TCa, TNa e TCAL

Tratamento	$\gamma_{dmax}$ (g cm <sup>-3</sup> )	$W_{ót}$ (%)	E	$S_r$ (%)
ST	1,38	31,37	1,01	87,0
TCa	1,48	28,03	0,84	90,3
TNa	1,48	28,36	0,85	90,7
TCAL	1,39	31,51	1,00	87,6

Observando-se os resultados apresentados na Figura 2-11 e na Tabela 2-5, nota-se a ocorrência de variação significativa nos parâmetros ótimos de compactação dos solos TCa e TNa em comparação com os solos ST e TCAL,

---

para fins práticos de engenharia. Tomando-se como referência o solo ST, esses tratamentos produziram acréscimos na massa específica aparente seca máxima e decréscimos no teor de umidade ótima que, possivelmente, devem estar associados a aumentos na espessura da dupla camada difusa de suas partículas argilosas devido à interação dos íons adicionados com o complexo sortivo do solo, favorecendo a ocorrência de fenômenos de dispersão e, posteriormente, facilitando o processo de compactação dos solos. Sabe-se que em estruturas dispersas, os efeitos da compactação são mais efetivos, o que, no presente caso, levou a uma movimentação da curva de compactação destes solos modificados 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 genérica, acredita-se que as mudanças ocorridas, com os solos TCa e TNa, no processo de compactação estejam diretamente relacionadas com as espessuras das duplas camadas difusas de suas frações argilosas. Cada um dos tratamentos aumentou a concentração de íons na solução de solo, seja ele  $\text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{Na}^+$  respectivamente. À parte o conhecido efeito dispersante do sódio, refere-se que em solos argilosos é comum associar-se fenômenos de floculação e de dispersão às variações na espessura da dupla camada difusa de suas partículas. Sabe-se que as superfícies das partículas, em geral carregadas negativamente, adsorvem cátions, de modo a neutralizar suas cargas negativas. No complexo de troca catiônica dos solos tropicais, encontram-se, principalmente,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{H}^+$  e  $\text{Mn}^{2+}$  e com a adição de  $\text{CaCl}_2$  ao solo, por exemplo, eleva-se a concentração de íons  $\text{Ca}^{2+}$  no complexo sortivo do solo, o que pode atuar no sentido de aumentar a pressão deste íon nos demais e fazer com que estes sejam deslocados e liberarem cargas que estavam sendo neutralizadas, passando os íons  $\text{Ca}^{2+}$  a ocuparem os pontos negativos nos colóides do solo. Portanto, se o  $\text{Ca}^{2+}$  está substituindo um cátion de maior força de ligação, por exemplo, como o  $\text{Al}^{3+}$ , ele não pode satisfazer toda a carga negativa neutralizada por este íon o que eleva a carga negativa do sistema e podem-se criar condições favoráveis à expansão da dupla camada difusa e, conseqüentemente, à ocorrência de



fenômenos de dispersão na massa de solo, favorecendo, assim, o processo subsequente de compactação.

Com relação ao solo TCAL, na Figura 2-11 observa-se que a sua curva de compactação se aproximou bastante daquela do solo ST, não ocorrendo variação significativa nos seus parâmetros ótimos de compactação. Esse tipo de comportamento tem sido relatado na literatura técnica em processos de estabilização de solos finos com cal hidratada, em especial com o emprego de teores pequenos deste agente, como se depreende dos trabalhos de Trindade et al. (2008) e Portelinha (2008). Destaca-se que a adição de cal hidratada a um solo eleva significativamente o seu pH, o que, geralmente, leva o íon  $\text{Ca}^{2+}$  a comportar-se como um elemento de floculação na fração argila da massa do solo.

### 2.5.6 Ensaio de caracterização química

A Tabela 2-6 traz os resultados da caracterização química dos solos ST, TCa, TNa e TCAL. Ressalta-se que os valores de pH foram medidos em água, na proporção volumétrica de 1:2,5.

Tabela 2-6. Propriedades químicas dos solos ST, TCa, TNa e TCAL

Características do solo		Amostras do solo ST e seus tratamentos				
		ST	TCa	TNa	TCAL	
Química	pH H <sub>2</sub> O	-	5,55	5,73	5,41	8,01
	K <sup>+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0,05	0,05	0,05	0,08
	Na <sup>+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0,07	0,08	20,00	0,06
	Ca <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0,64	11,09	0,49	5,11
	Mg <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0,02	0,00	0,00	0,00
	Al <sup>3+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00
	H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	1,10	1,00	1,30	0,00
	SB	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0,78	11,22	20,54	5,25
	CTC	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0,78	11,22	20,54	5,25
	V %	%	41,5	91,8	94,0	100

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 2-6, infere-se que os valores de pH dos solos TCa e TNa são semelhantes ao do solo ST; entretanto, o solo TCAL apresenta um valor de pH acima dos demais,

caracterizando-o como básico. Observa-se que os valores de capacidade de troca catiônica dos solos TCa, TNa e TCAL foram significativamente superiores ao do solo ST, respectivamente, com aumentos da ordem de 14, 26 e 7 vezes. A baixa CTC do solo ST é explicada pela natureza do seu material, que é caulinitico com a presença de óxidos de ferro e de alumínio. Nota-se, ainda, que ele foi o solo que apresentou menor índice de saturação de bases (V), com 41,5%, exibindo os demais valores na faixa de 91% a 100%. Observou-se que a acidez potencial ( $H^+ + Al^{3+}$ ) não variou significativamente entre os solos ST, TCa e TNa, bem como que no solo TCAL esse valor foi  $0,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , o que pode ser justificado pelo fato de não se encontrar  $Al^{3+}$  no mesmo e, devido ao maior quantitativo de hidroxila livre em sua solução, pelo seu maior pH.

## 2.6 CONCLUSÕES

Por meio do explanado no decorrer deste texto, é possível enumerar conclusões de relevância, como segue:

- o equipamento de percolação em coluna está dentro dos objetivos para os quais foi projetado, fornecendo valores confiáveis de coeficientes de condutividade hidráulica, além de possibilitar a realização de ensaios de condutividade hidráulica em menor tempo para solos finos compactados;
- os teores ótimos dos sais cloreto de cálcio e cloreto de sódio, da ordem de 1%, e de cal hidratada, da ordem de 2%, para a saturação em nível adequado do solo ST (maior do que 95%) foram de magnitude relativamente baixa, mas em quantitativos que podem ser aplicados em situações práticas de campo;
- para fins práticos de engenharia, os solos TCa e TNa não foram modificados granulometricamente, mantendo percentuais próximos aos do solo ST. Entretanto, a adição de cal hidratada ao solo ST implicou em redução expressiva da sua fração fina, devido à

---

ocorrência de fenômenos de floculação ocorridos entre a cal hidratada e os minerais de argila do solo;

- houve variação significativa nos limites de consistência do solo ST com a adição dos sais cloreto de cálcio e cloreto de sódio e de cal hidratada, ocorrendo redução no LL, LP e IP; contudo, não se observou a ocorrência de variação significativa no peso específico dos grãos, para fins práticos de engenharia;
- com relação aos parâmetros ótimos de compactação, apenas o solo TCAL não apresentou variação significativa com relação ao solo ST. Por outro lado, a adição dos sais ao solo ST produziu expansão de sua dupla camada difusa, favorecendo a ocorrência de fenômenos de dispersão e o consequente aumento da massa específica aparente seca máxima da ordem de 6,8% e redução do teor de umidade ótimo da ordem de 10,7%; e
- houve aumento significativo na CTC dos solos TCa, TNa e TCAL em relação ao solo ST, respectivamente, da ordem de 14, 26 e 7 vezes, bem como queda na acidez potencial e aumento no valor do pH no solo TCAL.

---

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos: método de ensaio. 12 f. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**. Solo - Determinação do limite de liquidez: método de ensaio. 6 f. Rio de Janeiro-RJ, Rio de Janeiro, 1984a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - ensaio de compactação: método de ensaio. 10 f. Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**. Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. 8 f. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

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. 8 f. Rio de Janeiro-RJ, Rio de Janeiro, 1984b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**. Solo - determinação do limite de plasticidade: método de ensaio. 3 f. Rio de Janeiro-RJ, Rio de Janeiro, 1984c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**. Solo – Análise granulométrica: método de ensaio. 13 f. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1984d.

CANESCHI, F. P. **Mudanças composicionais químicas e mineralógicas de um latossolo vermelho-amarelo visando a produção de solos modificados**. 2008. 83 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), UFV. Viçosa, Minas Gerais, 2008.

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.

GRIM, R. E. **Clay Mineralogy**. New York-NY: McGRAW-HILL BOOK COMPANY INC, 1968. - 2<sup>nd</sup> edition: 596 p.

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.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. John Wiley & Sons, Inc. New

---

York, 1969, 553 p.

LEITE, J. C.; PARAGUASSÚ, A. B.; ZUQUETTE, L. V. An equipment for percolation test in soil columns. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 4<sup>th</sup>, Lisboa, Portugal, 1998. Anais, V.1, pp. 211-215.

PACHECO E SILVA, D. **Influência da contaminação por cloreto de cobre na resistência ao cisalhamento de solos utilizados em liners**. 2005. 136 f. Dissertação. (Mestre em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2005.

PORTELINHA, F. H. M. **Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica**. 2008. 161 f. Universidade Federal de Viçosa, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), UFV. Viçosa, Minas Gerais, 2008.

TRINDADE, T. P.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; BARBOSA, P. S. A; SILVA, C. H. C.; MACHADO, C. C. **Compactação dos solos**. Viçosa: Editora UFV, 2008. ISBN: 978-857269-331-8.

YONG, R. N. **Geoenvironmental engineering: contaminated soils, pollutant fate and mitigation**. Boca Raton, London, New York, Washington, D. C.: CRC Press, 2001. ISBN: 0-8493-8289-0

---

### CAPÍTULO 3. CONCENTRAÇÕES DE METAIS PESADOS PARA PRODUÇÃO DE SOLUÇÃO CONTAMINANTE MULTIESPÉCIE

**Resumo.** O objetivo deste artigo foi realizar um levantamento de dados na literatura técnica nacional e internacional, para se definir as concentrações dos metais Cd, Mn, Ni, Pb e Zn de uma solução contaminante multiespécie a ser utilizada em ensaios de percolação em coluna. Na análise dos dados bibliográficos obtidos, trabalhou-se com a média da amostra e a média mais o desvio padrão, comparando-se os valores obtidos com aqueles médios da realidade brasileira, bem como com os permitidos pela legislação brasileira. A partir do resultado desta análise e adotando-se como critério trabalhar com valores de concentração superiores aos de campo, adotou-se um fator de correção de 10 vezes a média mais desvio padrão aplicado à concentração determinada para cada metal pesado. Assim, considerando-se uma possível distribuição normal dos dados de concentração dos metais pesados no campo, estatisticamente, esse procedimento adotado para a determinação dos valores de concentração dos componentes da solução multiespécie se relacionou com a adoção de valores de Z na faixa de 13 a 16, correspondendo, respectivamente, a riscos limites assumidos de ocorrerem valores acima do intervalo  $(\mu+Z\sigma)$  de 0%, para fins práticos de engenharia. Após análise dos dados coletados, observou-se que: (i) as concentrações dos metais em lixiviados não seguem um tendência, apresentado uma dispersão significativa, indicando uma forte influência da cultura regional; e (ii) as concentrações dos metais pesados usados na produção da solução multiespécie foram superiores àquelas encontradas na literatura consultada.

**Palavras-chave:** metais pesados, lixiviados, solução multiespécie, consulta bibliográfica.

---

### 3.1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a geração de resíduos vem aumentando e estes são direcionados para locais de destinação final. Essas áreas estão diretamente ligadas aos riscos de contaminação ambiental, com relevância para a contaminação do solo com metais pesados, com destaque para As, Ag, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Sn e Zn (YONG, 2001). No caso dos metais pesados, eles são prejudiciais à vida humana, bem como de plantas e animais quando ocorrem em quantitativos anormais, ou seja, além daquele necessário para o bom funcionamento do organismo. Por outro lado, têm a característica de serem cumulativos, não sendo expulsos e na maioria das vezes produzindo distúrbios nos organismos vivos.

Embora parte deles seja essencial para a vida de certos seres vivos, como é o caso do Cu, do Mn, do Ni e do Zn que, dentro de certos limites são fundamentais para a saúde de plantas e animais. No caso humano concentrações superiores a certos limites podem se tornar problemáticas. Existem, ainda, outros tipos de elementos químicos que não possuem funcionalidade para a vida e, ao se concentrarem em determinadas partes do organismo, se tornam nocivos, como o Cd e Pb (SELIM e AMACHER, 1997), além daqueles com maior facilidade de serem encontrados no ambiente contaminado através de ações antrópicas.

Apesar de serem vários os metais pesados, o presente estudo, trata apenas dos elementos Cd, Mn, Ni, Pb e Zn.

O Cd é ocupante da coluna 2B da tabela periódica dos elementos químicos, ele possui número atômico 48 e massa molecular de 112,4. Como principais características, o Cd é um metal de cor branco azulada, dúctil e maleável. Apresenta estrutura iônica similar à do Zn e, segundo Pendias e Mukherjee (2007), sua média na crosta terrestre é de 0,1 a 0,2 mg kg<sup>-1</sup>. Sua obtenção é geralmente como subproduto do Zn, sendo separado por precipitação com sulfatos ou por destilação. O referido autor destaca que 70% da produção mundial são usadas na fabricação de baterias e os outros 30% restante distribuídos entre pigmentos, revestimentos, estabilizantes e ligas, dentre outros produtos.

---

O Cd é um elemento com média global de concentração no solo entre 0,06 – 1,1 mg kg<sup>-1</sup> (PENDIAS e MUKHERJEE, 2007). Segundo esse autor, do ponto de vista ambiental, dentre as fontes de deposição desse metal no solo, a atmosférica é a maior, seguido pela ação de fertilizantes, sendo que a maior parte da poluição por Cd está nos primeiros 15 cm de profundidade do perfil de solo.

Nos humanos, o acúmulo do Cd no corpo induz o aparecimento de uma série de anomalias, tais como problemas renais, enfisema pulmonar (ou até mesmo o aparecimento de câncer de pulmão), hipertensão, redução da fertilidade, dentre outros. Ressaltando que o CONAMA (2011) prevê que as condições padrões para lançamento de efluentes em corpos receptores é de 0,2 mg L<sup>-1</sup> de Cd total.

O Mn é um dos elementos do grupo 7 da tabela periódica, sendo o único essencial para a vida dos organismos (PENDIAS e MUKHERJEE, 2007). Possui número atômico 25, massa molecular de 54,9 e densidade de 7,44 g cm<sup>-3</sup> a 20 °C. Segundo esse autor, seu uso está ligado às indústrias metalúrgica e elétrica, produtos pigmentantes, fertilizantes e suplementos alimentares, dentre outros usos.

Pendias e Mukherjee (2007) ainda relatam que todos os compostos de Mn são constituintes importantes do solo, por serem essenciais para a nutrição das plantas e a atividade microbiótica dos solos. De acordo com o CONAMA (2011) as condições padrão para lançamento de efluentes em corpos receptores é de 1,0 mg L<sup>-1</sup> de Mn dissolvido.

Segundo Pendias e Mukherjee (2007), o elemento Ni está localizado no grupo 10 da tabela periódica de elementos, com número atômico 28, massa molecular de 58,69 e densidade 8,9 g cm<sup>-3</sup> a 20 °C, possui coloração branco-prateada com capacidade de condução de eletricidade e calor, com boa ductilidade e maleabilidade, porém não pode ser laminado, polido ou forjado facilmente. Uma característica importante é a sua resistência à corrosão e o seu uso como revestimento por eletrodeposição (QUIMLAB, 2012).

Tem-se, ainda, que é comum seu uso em componentes magnéticos e equipamentos elétricos, bem como que outros usos são comuns, por exemplo, na produção de aço inoxidável e em processos de niquelagem, em geral



---

(QUIMLAB, 2012). Ressalta-se que segundo o CONAMA (2011), as condições padrão para o lançamento de efluentes em corpos receptores é de  $2,0 \text{ mg L}^{-1}$ .

A escolha do Pb se deve à sua relativa abundância como contaminante de solos, em especial dos solos de fundação de aterros sanitários. Do latim plumbum, o Pb é o elemento químico de símbolo Pb, com número atômico 82 e massa molecular 207,2 u, que pertence ao grupo 2B da tabela periódica dos elementos químicos e se encontra no estado sólido nas condições ambientes (PENDIAS e MUKHERJEE, 2007). Segundo esse autor o Pb é um metal pesado que está sendo utilizado pelos humanos há, no mínimo, 7.000 anos, por ser abundante na natureza e de fácil extração, além da facilidade de ser trabalhado, possuir elevada maleabilidade, ductilidade e baixo ponto de fusão. Segundo o ICZ (2011), ele possui densidade relativa de 11,4 a  $16 \text{ }^\circ\text{C}$ , cor branca - azulada e torna-se acinzentado quando exposto ao ar.

Dos poluentes ambientais mais conhecidos, o Pb tem sido persistentemente prejudicial à saúde do homem, dos animais e das plantas (PENDIAS e MUKHERJEE, 2007). Nas décadas de 70 e 80, uma das maiores fontes emissoras de Pb era a queima de gasolina, que o tinha em sua composição. Mais tarde, na década de 90, eliminou-se o uso deste produto na gasolina. Contudo alguns países africanos, como a Nigéria, ainda fazem o uso do mesmo, alcançando-se a margem de  $0,6 \text{ g L}^{-1}$  (PENDIAS e MUKHERJEE, 2007).

Na atualidade, este metal ainda é largamente utilizado, principalmente na fabricação de acumuladores, como manta protetora para os aparelhos de raios-x, em pigmentos, forros de cabos, dentre outras aplicações. A forma mais adequada de destinação final dos elementos que contém Pb na sua constituição tem sido o seu recolhimento para a devida reciclagem, de modo a se evitar contaminações dos ambientes e, conseqüentemente, redução de futuras extrações. Apesar de ser a forma mais indicada para destinação de um produto que contém Pb, a reciclagem se utiliza de processos que geram, como qualquer outra atividade, gases e efluentes que estão contaminados com este metal. Assim, tem-se que a cada tonelada de metal reaproveitado, de 150 a 300 kg de resíduos sólidos contaminados com Pb são gerados (Quimlab 2012).

---

Em termos de legislação, o CONAMA (2011) entende que as condições padrão para lançamento de efluentes em corpos receptores é de  $0,5 \text{ mg L}^{-1}$  de Pb total.

Com respeito ao Zn, Pendas e Mukherjee (2007) destacam que ele está localizado no grupo 12 da tabela periódica de elementos, com número atômico 30, massa atômica 65,38 e densidade  $7,13 \text{ g cm}^{-3}$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Segundo esses autores, o seu uso se dá, principalmente, nas indústrias que tratam de materiais metálicos, aplicando uma cobertura de Zn para fim de evitar a corrosão, bem como em outros setores como baterias, componentes automotivos e outros. Para esse metal o CONAMA (2011) entende que as condições padrão para lançamento de efluentes em corpos receptores é de  $5,0 \text{ mg L}^{-1}$ .

De modo geral o objetivo desse estudo foi de levantar um banco de dados de concentrações dos metais Cd, Mn, Ni, Pb e Zn em lixiviados, por meio de consultas em literatura.

### **3.2 MÉTODOS**

Essa etapa foi conduzida por meio de consulta à literatura técnica nacional e internacional que trata das concentrações de metais pesados nos solos, em especial os cinco estudados neste trabalho, e da caracterização de chorume de aterros sanitários, com o intuito de se definir os valores de concentração dos metais pesados Cd, Mn, Ni, Pb e Zn de uma solução contaminante multiespécie a ser utilizada em ensaios de percolação em coluna.

O primeiro passo foi buscar na literatura quantitativos de cátions em lixiviados oriundos de áreas contaminadas, tais como aterros sanitários ou controlados, montando-se um banco de dados abrangente. Na sequência, procedeu-se ao cálculo da média e do desvio padrão da amostra de cada cátion e comparou-se o conjunto de resultados com valores médios e máximos de concentrações de metais pesados encontrados em lixiviados de aterros sanitários brasileiros (SOUTO e POVINELLI, 2007), bem como os valores máximos permitidos para lançamento no ambiente, de acordo com a legislação brasileira (CONAMA, 2011).

---

A partir do resultado dessa análise e adotando-se como critério trabalhar com valores de concentração superiores aos de campo, adotou-se um fator de correção de 10 vezes a média mais desvio padrão aplicado à concentração determinada para cada metal pesado.

### **3.3 RESULTADOS**

Na Tabela 3-1 apresentam-se os resultados da pesquisa bibliográfica nacional e internacional referente às concentrações de metais pesados advindas de lixiviados de aterros sanitários e áreas equivalentes, onde a primeira coluna da esquerda para a direita representa a contagem das amostras, seguida pelas colunas das concentrações dos metais Cd, Mn, Ni, Pb e Zn, sendo que por último têm-se as respectivas referências bibliográficas. Através da análise da origem dos resultados apresentados na Tabela 3-1, observa-se que os valores listados são específicos de determinadas regiões, possivelmente associados às culturas locais. Com os dados da Tabela 3-1 e os valores de referência do CONAMA (2011) para os limites de lançamento de efluentes no meio ambiente, montou-se um gráfico apresentado na Figura 3-1, para efeito de comparação.

Entretanto, considerando-se que o objetivo desse estudo foi definir as concentrações de cada metal pesado para produção da solução multiespécie, de modo que a mesma representasse, no mínimo, a realidade passível de ser encontrada no campo, por segurança, optou-se definir estas concentrações aumentando-se os valores através da adoção de um fator de multiplicação de 10, aplicado sobre os quantitativos referentes ao intervalo de cada média mais o respectivo desvio padrão ( $\mu + \sigma$ ), na busca de se aumentar a faixa de abrangência do trabalho e, obviamente, reduzir-se o risco. Considerando-se uma possível distribuição normal dos dados de concentração dos metais pesados no campo, estatisticamente, esse procedimento adotado para a determinação dos valores de concentração dos componentes da solução multiespécie se relaciona com a adoção de valores de Z na faixa de 13 a 16, correspondendo, respectivamente, a riscos limites assumidos de ocorrerem valores acima do intervalo ( $\mu + Z\sigma$ ) de 0%, para fins práticos.

Tabela 3-1. Valores das concentrações dos metais Cd, Mn, Ni, Pb e Zn com as respectivas fontes de consultas

Amostra	Concentração dos metais (mg L <sup>-1</sup> )					Fonte
	Cd	Mn	Ni	Pb	Zn	
1	0,020	-	-	0,220	0,250	(AMARAL, <i>et al.</i> , 2008)
2	0,005	0,350	0,140	0,130	0,680	(SISINNO e MOREIRA, 1996)
3	-	2,700	1,060	-	0,780	(TARTARI, 2003)
4	0,250	0,850	5,800	1,910	2,200	(ÇEÇEN e GÜRISOY, 2000)
5	0,012	0,676	-	2,372	9,146	(CELERE, <i>et al.</i> , 2007)
6	0,005	-	0,178	0,010	0,090	(LANGE, <i>et al.</i> , 2006)
7	-	35,00	1,800	-	-	(OLIVEIRA e JUCA, 2004)
8	0,232	-	0,572	0,531	0,647	(OLIVEIRA e PASQUAL, 2004)
9	0,004	0,179	0,114	0,002	0,053	(SUZUKI, <i>et al.</i> 2005)
10	0,070	0,780	0,450	0,710	5,120	(MONDELLI, <i>et al.</i> 2004)
11	-	0,917	0,012	0,004	-	(JASKELEVICIUS e LYNIKIENÉ, 2009)
12	0,100	-	0,300	0,100	0,780	(HYPOLITO e EZAKI, 2006)
13	0,002	-	0,270	0,030	1,210	(HYPOLITO e EZAKI, 2006)
14	-	-	-	1,000	2,500	(WARITH e YONG, 1991)
15	0,060	-	0,410	1,540	2,210	(MOR, <i>et al.</i> , 2006)
16	0,030	-	0,670	0,180	0,800	
17	0,020	-	0,270	0,320	0,400	(SABAHI, <i>et al.</i> , 2009)
18	0,000	-	0,185	1,850	1,610	
19	0,022	4,400	-	0,280	1,900	(XIU-FEN, <i>et al.</i> 2009)
20	0,010	0,130	0,140	0,040	0,030	
21	0,010	1,190	0,290	0,040	0,030	
22	0,010	0,012	0,090	0,056	0,080	
23	0,001	0,860	0,120	0,004	0,170	
24	0,001	0,400	0,110	0,070	1,240	(ROBINSON, 2007)
25	0,002	6,560	0,100	0,150	1,650	
26	0,005	0,240	1,000	1,000	0,150	
27	0,005	0,600	1,000	1,000	0,610	
28	0,005	1,650	1,000	1,000	0,240	
29	0,002	0,473	0,380	0,300	0,463	
30	0,010	-	-	-	0,060	(FERREIRA, <i>et al.</i> , 2001)
31	0,006	-	0,130	0,070	0,670	
32	0,005	-	0,170	0,090	0,600	
33	0,006	-	0,050	0,020	2,200	
34	0,000	-	0,028	0,005	0,200	
35	0,000	-	0,084	0,056	0,360	(KJELDEN, <i>et al.</i> , 2002)
36	0,000	-	0,054	0,056	0,085	
37	0,004	-	0,062	0,188	5,310	
38	0,004	-	0,080	0,067	0,011	
39	0,018	-	0,348	0,019	9,000	
40	0,040	-	0,100	0,130	0,470	
41	0,065	2,000	0,500	0,500	1,500	(SOUTO e POVINELLI, 2007)
42	0,100	0,080	1,430	0,280	1,060	(MORAIS, 2005)
43	0,000	0,550	0,132	0,001	-	(NÓBREGA, <i>et al.</i> , 2009)

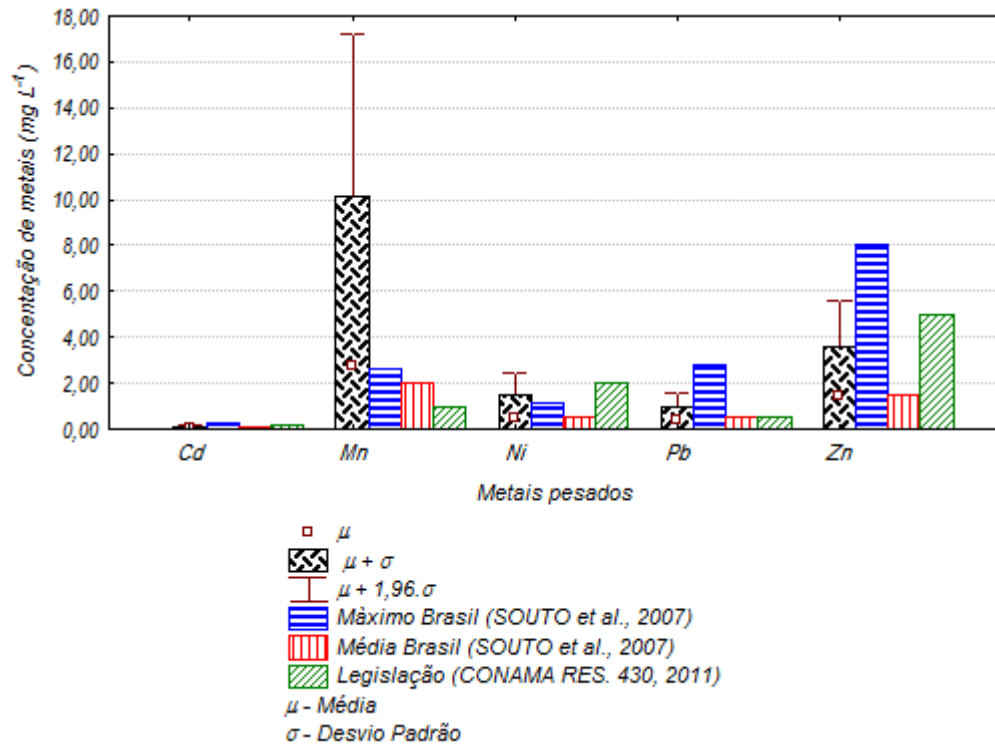


Figura 3-1. Concentrações de metais pesados.

Na Tabela 3-2, apresentam-se faixas de estimativas de valores máximos ( $\mu + Z\sigma$ ), valores de concentração dos respectivos metais pesados e probabilidades de ocorrência de valores acima destas faixas, para  $Z$  igual a 0 e 1, também na Tabela 3-3, tem-se os valores de concentração utilizados na produção da solução multiespécie dos metais pesados para o presente trabalho. Destaca-se que, estatisticamente, é impossível se anular a probabilidade  $P$ , por maior que seja o valor de  $Z$ , sendo comum considerar que o intervalo ( $\mu \pm 3\sigma$ ) engloba todos os valores da distribuição, para fins práticos de engenharia. Como já se referiu, para o presente caso, optou-se por determinar as concentrações de trabalho dos metais pesados para a composição da solução multiespécie com o emprego de um fator de multiplicação de 10, que corresponde a valores de  $Z$  de 15,2, 13,5, 14,8, 16,15 e 15,9, respectivamente, para o Cd, Mn, Ni, Pb e Zn. Portanto, todas as concentrações adotadas são superiores aos valores encontrados em engenharia, o que representa para fins práticos uma probabilidade 0% de ocorrência de valores acima da faixa ( $\mu + 3\sigma$ ).

Tabela 3-2. Valores da concentração dos metais Cd, Mn, Ni, Pb e Zn

Faixa ( $\mu+Z\sigma$ ) para estimativa de valores máximos, para Z igual a 0 e 1	Concentração dos metais ( $\text{mg L}^{-1}$ )					Probabilidade (%) de ocorrência de valores acima da faixa ( $\mu+Z\sigma$ )
	Cd	Mn	Ni	Pb	Zn	
$\mu$	0,029	2,754	0,517	0,408	1,414	50,0
$\mu + \sigma$	0,086	10,12	1,491	1,008	3,563	15,9

A Tabela 3-3 apresenta as concentrações, em  $\text{mg L}^{-1}$  e  $\text{mmol L}^{-1}$  de cada metal pesado (valores obtidos multiplicando os valores de média mais desvio padrão por 10), bem como os sais correspondentes para a produção da solução multiespécie.

Tabela 3-3. Concentração utilizada na elaboração da solução afluente multiespécie

Metal pesado	Concentração à ser utilizada ( $\text{mg L}^{-1}$ )	Concentração ( $\text{mmol L}^{-1}$ )	Sal correspondente
Cd	0,9	0,008	$\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$
Mn	101,2	1,842	$\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$
Ni	14,9	0,254	$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$
Pb	10,1	0,049	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$
Zn	35,6	0,545	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$

### 3.4 CONCLUSÃO

Através de consultas realizadas em bibliografias nacionais e internacionais pode-se concluir que:

- em primeira análise, as concentrações dos metais estudados identificados na literatura, não seguem uma tendência, apresentando dispersão significativa, indicando que, possivelmente, tais valores têm forte relação com a cultura regional; e
- as concentrações definidas para comporem a solução multiespécie estão acima dos valores encontrados na literatura consultada, o que

---

representa um conjunto de possíveis situações de campo extremas representadas nos ensaios de percolação em coluna.

---

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AMARAL, M. C. S.; FERREIRA, C. F. A.; LANGE, L. C.; AQUINO, S. F. Avaliação da biodegradabilidade anaeróbia de lixiviados de aterro sanitário. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, Rio de Janeiro, RJ, v. 13, n. 1, p. 38-45, jan/mar 2008.

ÇEÇEN, F.; GÜRSOY, G. Characterization of landfill leachates and studies on heavy metal removal. **The Royal Society of Chemistry**. J. Environ. Monit., v. 2, p. 436±442, 2000. DOI: 10.1039/b004729p.

CELERE, M. S.; OLIVEIRA, A. S.; TREVILATO, T. M. B.; SEGURA-MUÑOZ, S. I. Metais presentes no chorume coletado no aterro sanitário de Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, e sua relevância para saúde pública. **Caderno Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 23, n 4, p. 939-947, abr, 2007.

CONAMA. Resolução nº 430, 16 de maio de 2011. Dispõe sobre condições e padrões de lançamentos de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil** n. 62, de 16 mai. 2011, Seção 1, p. 89-91.

FERREIRA, J. A.; GIORDANO, G.; RITTER, E.; ROSSO, T. C. A.; CAMPOS, J. C.; LIMA, P. Z. M. Uma revisão das técnicas de tratamento de chorume e a realidade do estado do Rio de Janeiro. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21, 2001, João Pessoa. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 2001, p. 26-34.

HYPOLITO, R.; EZAKI, S. Íons de metais pesados em sistema de solo-lixo-chorume-água de aterros sanitários da região metropolitana de São Paulo-SP. **Águas Subterrâneas**, v. 20, n. 1, p. 99-114, 2006.

ICZ- Instituto de Metais Não Ferrosos Características Técnicas do Chumbo. Disponível em <<http://www.icz.org.br/chumbo-caracteristicas-tecnicas.php>>. São Paulo, SP, Brasil. Acessado em 10 de novembro de 2011.

JASKELEVICIUS, B.; LYNKIENE, V. Investigation of influencee of Lapes Landfill leachate on ground and surface water pollution with heavy metals. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, v. 17, n. 3, p. 131-139, 2009.

KJELDEN, P.; BARLAZ, M. A.; ROOKER, A. P.; BAUN, A.; LEDIN, A.; CHRISTENSEN, T. H. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. CRC Press LLC. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 32 n. 4, p. :297-336, 2002.

LANGE, L. C.; ALVES, J. F.; AMARAL, M. C. S.; JUNIOR, W. R. M. Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por processo oxidativo avançado empregando



---

reagente de FENTON. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 11, n. 2, p. 175-183, abr/jun 2006.

MONDELLI, G.; BOSCOV, M. E. G.; GIACHETI, H. L. Ensaios de coluna e de adsorção em lote em amostras de solo do entorno do aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru-SP. In: Geo-Jovem 2004: 1º Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, 2004, São Carlos, SP. Geo-Jovem 2004. v. CR-ROM

MOR, S.; RAVINDRA, K.; DAHIYA, R. P.; CHANDRA, A. Leachate characterization and assessment of groundwater pollution near municipal solid waste landfill site. Springer. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 118, p. 435–456, 2006. DOI: 10.1007/s10661-006-1505-7.

MORAIS, J. L. **Estudo da potencialidade de processos oxidativos avançados, isolados e integrados com processos biológicos tradicionais, para tratamento de chorume de aterro sanitário**. 2005. 207 f. Tese. (Doutorado em Química). Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, 2005.

NÓBREGA, M. R. R.; KOHN, L. G.; MILANI, I. C. B.; NEBEL, A. L. C.; TAVARES, V. E. Q.; SUZUKI, L. E. A. S.; COLLARES, G. L. Caracterização do chorume de um aterro controlado em Pelotas/RS In: XVIII Congresso de Iniciação Científica, o XI Encontro de Pós-Graduação e a I Mostra Científica - "EVOLUIR SEM EXTINGUIR: POR UMA CIÊNCIA DO DEVIR". Pelotas: [s.n.]. 2009. p. 4.

OLIVEIRA, F. J. S.; JUCA, J. F. T. Acúmulo de metais pesados e capacidades de impermeabilização do solo imediatamente abaixo de uma célula de um aterro de resíduos sólidos. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 211-217, jul/set 2004.

OLIVEIRA, S.; PASQUAL, A. Avaliação de parâmetros de indicadores de poluição por efluente líquido de um aterro sanitário. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 240-249, jul/set 2004.

PENDIAS, A. K.; MUKHERJEE, A. B. **Trace elements to soil from to human**. Berlin: Springer, 2007. ISBN-10 3-540-32713-4. 550 p.

QUIMLAB – Soluções em química. Disponível em <<http://www.quimlab.com.br/guiadoselementos/chumbo.htm>>. Jacareí, SP, Brasil. Acessado em 10 de maio de 2012.

ROBINSON, H. The composition of leachates from very large landfills: an international review. **CWRM**, v. 8 (1), p. 19-32, June 2007. IWM Business Services Ltd.

SABAHI, E. A.; RAHIM, S. A.; ZUHAIRI, W. Y. W.; NOZAILY, F. A.; ALSHAESBI, F. Leachate composition and groundwater pollution at municipal solid waste landfill of Ibb City, Yemen. **Sains Malaysiana**, v. 38, n. 3, p. 295–304, 2009.

SELIM, H. M. e AMACHER, M. C. **Reactivity and Transport of Heavy Metals**

---

**in Soils**. Boca Raton, New York, London, Tokyo: Lewis Publishers, 1997. ISBN: 0-87371-473-3.

SISINNO, C. L. S.; MOREIRA, J. C. Avaliação da contaminação e poluição ambiental na área de influência do aterro controlado do Morro do Céu, Niterói, Brasil. **Caderno Saúde Pública**, Rio de Janeiro, 12(4):515-523, out-dez, 1996.

SOUTO, G. D'A. B.; POVINELLI, J. Características do lixiviado de aterros sanitários no Brasil. In: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Belo Horizonte, MG, 2007. p. 16.

SUZUKI, E. Y.; TAIOLI, F.; RODRIGUES, C. L. Avaliação do comportamento geoquímico do solo da região do lixão de Ilhabela-SP. **Águas subterrâneas**, v. 19, n. 2, p. 67-76, 2005.

TARTARI, L. C. **Avaliação do processo de tratamento do chorume do aterro sanitário de Novo Hamburgo**. 2003. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia-Energia, Ambiente e Materiais. ULBRA. RS. Canoas, RS, 2003.

WARITH, M. A.; YONG, R. N. Landfill leachate attenuation by clay soil. Mary Ann Liebert, Inc. **Hazardous Waste & Hazardous Materials**, v. 8, n. 2, 1991.

XIU-FEN, BARNES, D.; JIAN, C. Performance of struvite precipitation during pretreatment of raw landfill leachate and its biological validation. Springer. **Environ Chem Lett** DOI 10.1007/s10311-009-0248-4, oct. 2009.

YONG, R. N. **Geoenvironmental engineering**: contaminated soils, pollutant fate and mitigation. Boca Raton, London, New York, Washington, D. C.: CRC Press, 2001. ISBN: 0-8493-8289-0.

---

## CAPÍTULO 4. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS MODIFICADOS

**Resumo.** Este artigo tem como objetivo analisar o comportamento mecânico do solo ST, bem como dos solos modificados com cal hidratada (solo TCAL) e com os cloretos de cálcio (solo TCa) e de sódio (solo TNa), após a realização dos ensaios de percolação em coluna com solução multiespécie dos metais pesados Cd, Mn, Ni, Pb e Zn. No estudo, trabalhou-se com os resultados dos ensaios de laboratório de cisalhamento direto, compressão não confinada, cone penetrométrico quase-estático e retração. Após a finalização dos ensaios de percolação em coluna, os corpos de prova foram retiradas dos permeômetros, moldando-se novos corpos de prova para a realização dos referidos ensaios de laboratório. Da análise dos dados obtidos, pode-se concluir que: (i) o solo TCAL apresentou o melhor desempenho mecânico em todos os ensaios realizados, bem como melhor resposta nos ensaios de cisalhamento direto e compressão não confinada; (ii) evidencia-se que o tratamento do solo ST com cal hidratada, solo TCAL, foi responsável por possíveis fenômenos de floculação e reações pozolânicas responsáveis pela produção de uma estrutura de solo cimentada e mais rígida que as demais, em especial, considerando-se os resultados dos ensaios com o cone penetrométrico quase-estático, quando se notou uma influência pouco significativa da base do corpo de prova na resistência de ponta medida; e (iii) os ensaios de retração não apresentaram diferenças significativas entre os solos; mas, ainda assim, o solo TCAL apresentou valores menores de retração, mostrando-se este tratamento mais eficiente que os demais.

**Palavras-chave:** resistência mecânica, solos modificados, metais pesados, ensaios de percolação em coluna.

---

## 4.1 INTRODUÇÃO

Barreiras impermeáveis, barreiras selantes, liners são denominações semelhantes dadas aos elementos de obras de engenharia que, além de função estruturante, devem apresentar como características uma baixa condutividade hidráulica, resistência mecânica superiores às condições de projeto, às intempéries e manutenção de suas propriedades durante o período de projeto. Quanto aos materiais de construção, podem ser utilizados materiais naturais como solo, e artificiais como geossintéticos, e até mesmo a combinação de ambos (ALONSO, 2005).

Em se tratando de condutividade hidráulica, Williams (2005) relata que as barreiras impermeáveis necessitam de condições mínimas para desempenharem, com eficiência, seu papel. Esse autor, ainda, informa valores limites, por exemplo, para a condutividade hidráulica, que deve ser inferior a  $1.10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ , para resíduos perigosos, permitindo-se o uso de materiais com até  $1.10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ , no caso de descarte de materiais inertes. Entretanto, refere-se que a condutividade hidráulica não é o único fator de projeto e construção a ser considerado.

Uma baixa condutividade hidráulica está, principalmente, associada a um índice de vazios reduzido de um solo (LAMBE e WHITMAN, 1969). Entretanto, na maior parte das vezes, ao se buscar solos de menor condutividade hidráulica, tem-se materiais de menor resistência mecânica. Esse não é um comportamento desejado, uma vez que as barreiras impermeáveis necessitam de baixos valores de condutividade hidráulica e alta resistência mecânica (HEINECK, 2002).

Uma das análises a ser considerada é a estabilidade dos maciços a serem formados na execução de aterros, no sentido de se evitar a ruptura de seus taludes. Dentro desse contexto, é imprescindível o conhecimento do comportamento geotécnico do material empregado. Para isso, é necessário ter-se conhecimento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento (ângulo de atrito e coesão) do solo que constitui, por exemplo, uma barreira selante, bem como, pela simplicidade de obtenção, da resistência à compressão não confinada. Por outro lado, resultados de ensaios geotécnicos de campo, por

---

exemplo o cone penetrométrico (CPT), podem ser de extrema importância, uma vez que permitem correlacionar a resistência de ponta com a capacidade de carga do solo.

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. Sob essa visão, é intuitivo que o processo de contaminação de solos com metais pesados deve influenciar o comportamento mecânico destes materiais.

Mesmo considerando que os dados de comportamento hidráulico e mecânico dos solos, também, vê-se a necessidade de entender as suas variações de volume quando compactados, devido às perdas de umidade, principalmente, quando empregados em camadas superficiais ou de cobertura. Daniel e Koerner (1993 apud HEINECK, 2002) apresentam fatores que são extremamente importantes no projeto de barreiras de coberturas, dentre outros, como variações de temperatura e de umidade, recalques diferenciais, fluxo de veículos, erosão, escorregamentos e sobrecargas ao longo do tempo.

Diante do exposto, este capítulo tem como objetivo analisar o comportamento mecânico dos solos estudados através de ensaios de cisalhamento direto, compressão não confinada, cone penetrométrico e ensaio de retração de dimensões após ensaio de percolação em coluna com solução contaminante multiespécie de metais pesados.

## **4.2 MATERIAIS**

### **4.2.1 Solo**

Para realização deste estudo, trabalhou-se com um solo residual maduro de gnaiss, classificado pedologicamente como Latossolo Vermelho-Amarelo e geotecnicamente como A-7-5 (Sistema TRB), CH (Sistema USC) e LG' (Metodologia MCT), de grande ocorrência no território brasileiro, sobretudo na Zona da Mata Norte de Minas Gerais, e aqui denominado solo ST. Para a produção dos solos modificados, foram utilizados cal hidratada no teor de 2%

(solo TCAL) e cloretos de cálcio (Solo TCa) e de sódio (solo TNa) nos quantitativos de 1% em relação à massa de solo seco, segundo método descrito no Capítulo 2.

#### 4.2.2 Solução contaminante

A solução contaminante multiespécie definida no Capítulo 3 foi utilizada nos ensaios de percolação em coluna, nas concentrações de 0,9, 101,2, 14,9, 10,1 e 35,6 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente, para os metais Cd, Mn, Ni, Pb e Zn.

#### 4.2.3 Equipamento de percolação em coluna

Para a realização dos ensaios de percolação em coluna, utilizou-se o equipamento exposto na Figura 4-1, descrito no Capítulo 2. O equipamento é constituído basicamente por um painel de controle, um conjunto de células de interface e um conjunto de permeâmetros interligados por tubos flexíveis.

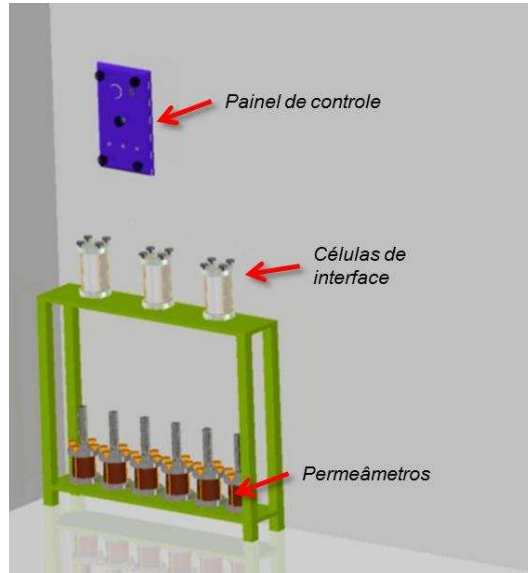


Figura 4-1. Equipamento de percolação em coluna.

O equipamento funciona basicamente por ar comprimido (alimentado por um compressor de ar), que pressuriza as células de interface, a fim de produzir o gradiente hidráulico desejado para promover o fluxo da solução contaminante multiespécie nos corpos de prova localizados nos permeâmetros. Após

---

percolação, o líquido é retido nos tubos de vidro graduado na parte superior, onde se faz a leitura do volume percolado e a coleta do efluente para análises posteriores.

### **4.3 MÉTODOS**

Primeiramente, foram obtidos os parâmetros ótimos de compactação dos solos, na energia do Proctor normal NBR 7182 (ABNT, 1986), para fins de moldagem dos corpos de prova a serem ensaiados no equipamento de percolação em coluna. Depois de concluída a fase de contaminação dos corpos de prova, eles foram extraídos dos permeâmetros imediatamente após a desmontagem de cada permeâmetro, confeccionando-se novos corpos de prova para a realização dos ensaios de resistência mecânica (cisalhamento direto, compressão não confinada e cone penetrométrico quase-estático) e de retração.

#### **4.3.1 Ensaios de cisalhamento direto**

Os ensaios realizados para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos foram conduzidos de acordo com as recomendações da ASTM D 3080 (ASTM, 1998).

Após a finalização dos ensaios de percolação em coluna de solo, os corpos de prova cilíndricos (dimensões de 12 cm de altura e 10 cm de diâmetro) foram retirados dos respectivos moldes e subdivididos em três novos corpos de prova (dimensões de 5 cm x 5 cm x 2 cm conforme Figura 4-2) e levados à ruptura no equipamento de cisalhamento direto, na velocidade de deslocamento horizontal de  $0,15 \text{ mm min}^{-1}$ , determinando-se as envoltórias a partir dos resultados obtidos pelos três corpos de prova. Na realização destes ensaios, foram utilizadas as tensões normais de 50, 100 e 200 kPa.

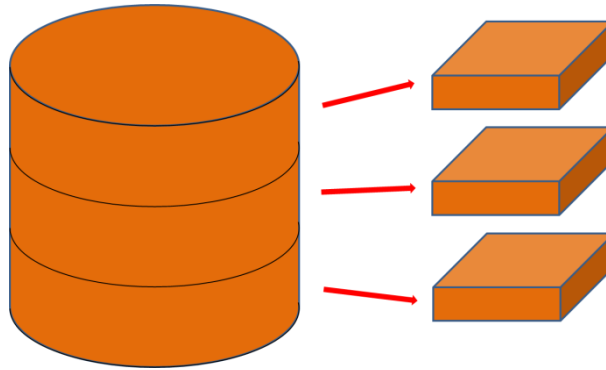


Figura 4-2. Esquema de produção dos corpos de prova.

### 4.3.2 Ensaios de compressão não confinada

Os ensaios realizados para obtenção da resistência à compressão não confinada foram conduzidos de acordo com as exigências da NBR 12770 (ABNT, 1992), com corpos de prova oriundos dos ensaios de percolação em coluna de solo, em que se trabalhou com elementos moldados nos parâmetros ótimos de compactação relativos à energia do ensaio Proctor normal.

Após a finalização dos ensaios de percolação em coluna de solo, os corpos de prova foram retirados dos respectivos cilindros e levados à ruptura em compressão não confinada, na velocidade de carregamento de  $1,0 \text{ mm min}^{-1}$ . Ressalta-se que não houve repetições de ensaios e que os resultados são aqueles constantes do corpo de prova de cada teor respectivamente.

### 4.3.3 Ensaios com o cone penetrométrico quase-estático

Do mesmo modo ao que ocorreu na realização do ensaio de compressão não confinada, as amostras empregadas nos ensaios de penetração quase-estática com um sistema penetrométrico produzido e implementado pela UFV por Dalla Riva (2010), conforme Figura 4-3 foram oriundas dos ensaios de percolação em coluna de solo. Para isso, ao término dos ensaios de percolação ensaiou-se uma amostra preparada sem extraí-la do cilindro (a amostra de cada um dos quatro solos foi oriunda do maior gradiente hidráulico empregado nos ensaios de percolação em coluna de solo).



Informa-se que o sistema de penetração quase-estática é composto de: (i) sistema hidráulico de cravação, com curso de até 60 cm; (ii) células de carga com capacidade na faixa de 20 kgf a 200 kgf; (iii) haste de penetração; (iv) sistema de aquisição de dados; e, (v) computador, conforme ilustrado na Figura 4-3.

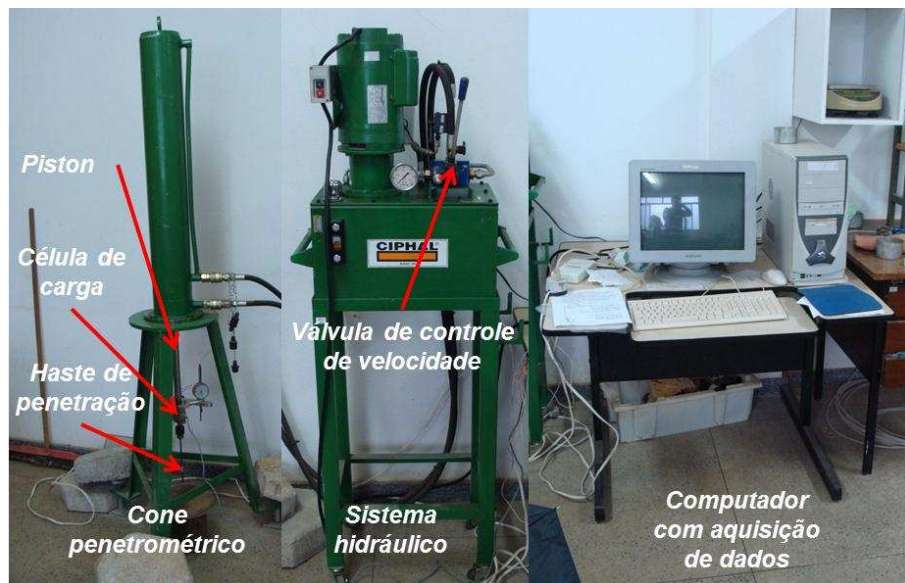


Figura 4-3. Equipamento de ensaio penetrométrico: (i) à esquerda, penetrômetro com pistão, célula de carga e base de apoio do corpo de prova; (ii) ao centro, sistema hidráulico incluindo bomba hidráulica e válvula de controle de velocidade de cravação; e (iii) à direita, computador com sistema de aquisição de dados.

Anterior à execução dos ensaios, fez-se a calibração das células de carga empregadas e da velocidade de deslocamento da haste do penetrômetro, de modo que esta se situasse na faixa de  $15 \pm 5 \text{ mm min}^{-1}$ . Com relação ao tratamento dos dados, empregou-se o procedimento descrito por Dalla Riva (2010).

#### 4.3.4 Ensaio de retração

Da mesma forma que ocorrem com os demais ensaios, os corpos de prova para a realização dos ensaios de retração foram obtidos daqueles utilizados nos ensaios de percolação em coluna.

Para cada um dos solos (ST, TCa, TNa e TCAL), foram moldados três pequenos corpos de prova, como se ilustra na Figura 4-4, por meio da cravação de um anel metálico cilíndrico com 2 cm de altura e 5 cm de diâmetro. Após a moldagem dos corpos de prova, estes foram acondicionados em um ambiente climatizado, com temperatura em torno de 20° C.

Para o início dos ensaios, foram considerados os valores das dimensões internas do cilindro metálico. A partir da segunda medição, a amostra se desprende do cilindro e então as medidas foram realizadas diariamente por meio de paquímetro até a estabilização dos valores encontrados.

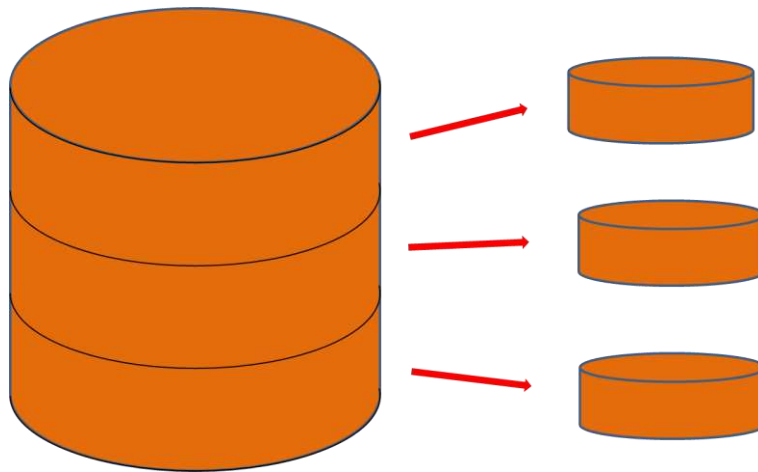


Figura 4-4. Esquema de produção dos corpos de prova.

Os resultados foram tratados de forma a se gerar um gráfico que reproduzisse o comportamento retrátil de cada corpo de prova ao longo do tempo, apresentando-se os resultados, em porcentagem, como sendo a média da relação entre a variação acumulada da dimensão medida e a dimensão inicial do corpo de prova, em concordância com Costa e Lollo (2007), com apenas a substituição de extensômetros por paquímetro nas medições realizadas.

## 4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.4.1 Curvas de compactação

A Tabela 4-1 traz os parâmetros ótimos de compactação dos solos, para a energia do Proctor normal.

Tabela 4-1. Parâmetros ótimos de compactação do solo ST, TCa, TNa e TCAL

Tratamento	$\gamma_{dmax}$ (g cm <sup>-3</sup> )	$W_{ót}$ (%)	e	$S_r$ (%)
ST	1,38	31,37	1,01	87,0
TCa	1,48	28,03	0,84	90,3
TNa	1,48	28,36	0,85	90,7
TCAL	1,39	31,51	1,00	87,6

Analisando-se os resultados da Tabela 5-1, observa-se que os tratamentos aplicados ao solo ST para a produção dos solos modificados resultaram em aumento significativo da massa específica aparente seca máxima para os solo TCa e TNa (aproximadamente 7%, para ambos os tratamentos), bem como redução do teor de umidade ótimo (aproximadamente 12%), que, possivelmente, devem estar associados a aumentos na espessura da dupla camada difusa das partículas argilosas devido à interação dos íons adicionados ao complexo sortivo do solo, favorecendo os fenômenos de dispersão e, posteriormente, o processo de compactação. Entretanto para o solo TCAL os parâmetros ótimos de compactação praticamente não variaram, confirmando os comportamentos relatado na literatura técnica em processos de estabilização de solos finos com cal hidratada, em especial para pequenos teores deste agente, como se depreende dos trabalhos de Trindade et al. (2008) e Portelinha (2008).

### 4.4.2 Ensaios de cisalhamento direto

Na Figura 4-5 apresentam-se as curvas tensão versus deslocamento lateral relativo dos ensaios de cisalhamento direto realizados.

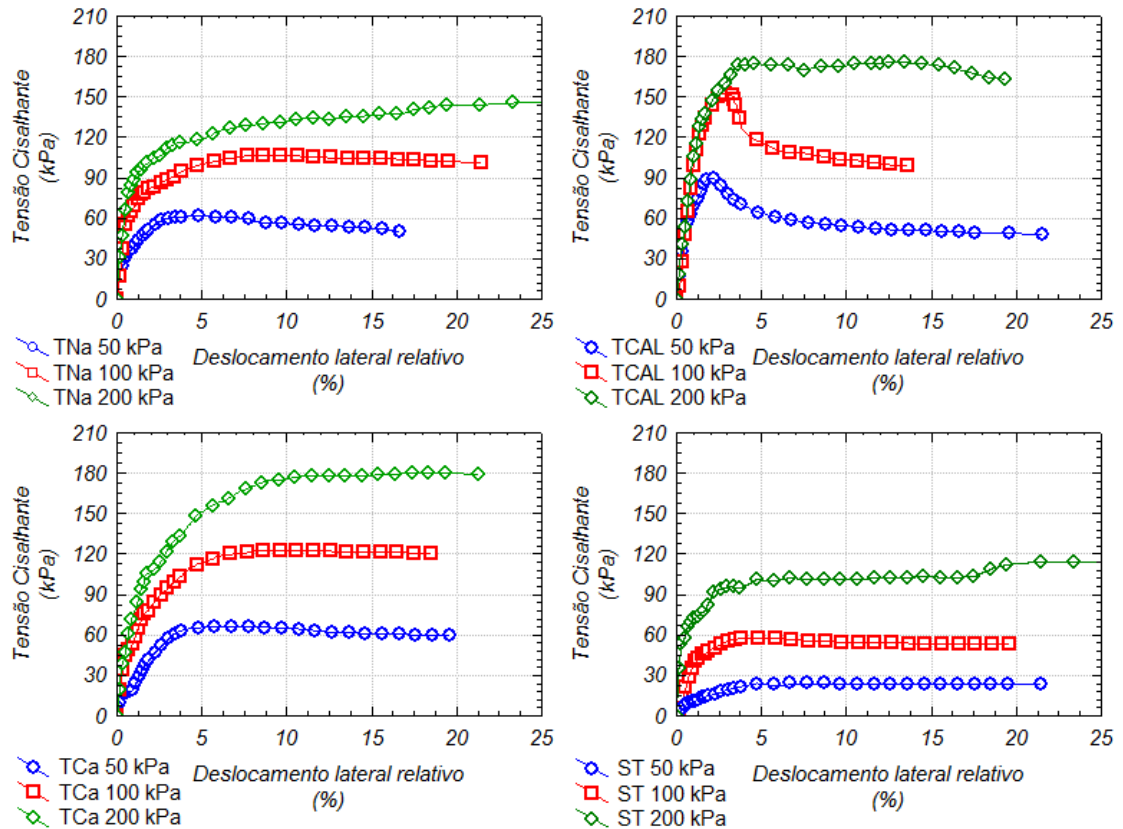


Figura 4-5. Curvas tensão versus deslocamento lateral relativo.

Na Figura 4-5, observa-se que o solo TCAL sobressai-se em relação aos demais, com valores de tensão de ruptura superiores, confirmando que o processo de adição de cal hidratada ao solo ST gera, a curto prazo, fenômenos de floculação ligados à redução de espessura de dupla camada difusa e a médio e longo prazo o desenvolvimento de reações pozolânicas, resultando em uma estrutura cimentada com comportamento frágil na ruptura. Por outro lado, nota-se que os solos TCa e TNa apresentam comportamento dúctil e rompem por deslocamento lateral relativo excessivo, mantendo comportamento semelhante ao do solo ST, mas com maiores tensões de ruptura.

Na Figura 4-6, tem-se as envoltórias de ruptura dos quatro solos aqui estudados.

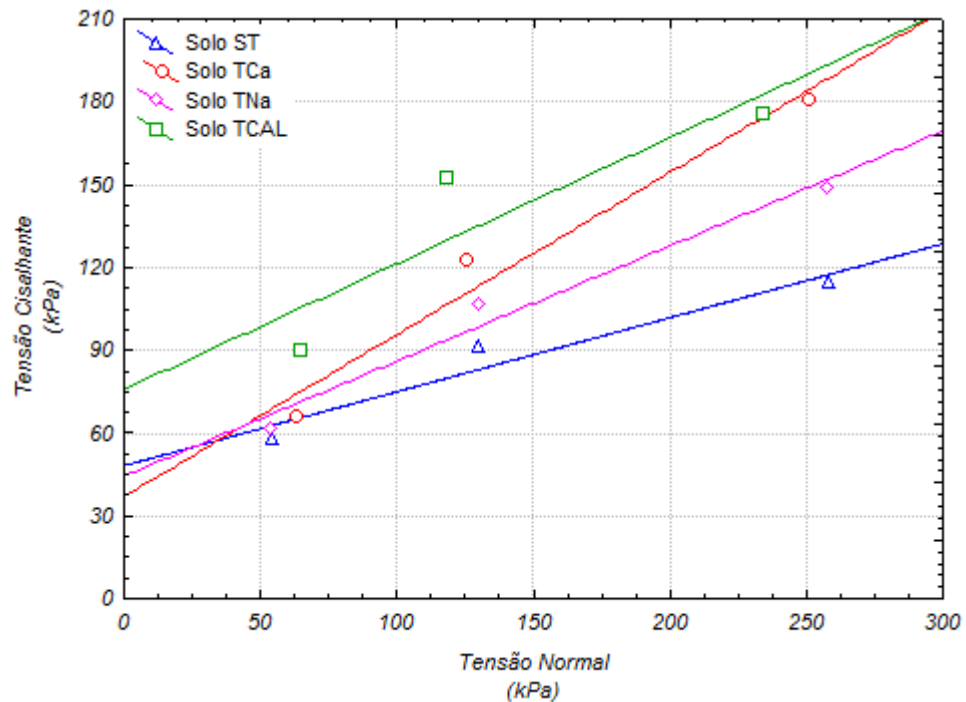


Figura 4-6. Envoltórias de ruptura para os solos estudados segundo ensaio de resistência ao cisalhamento direto.

Na Figura 4-6, percebe-se que o solo ST apresenta a menor resistência ao cisalhamento, seguido, respectivamente, pelos solos TNa, TCa e TCAL, evidenciando-se o efeito de flocculação e cimentação produzido pela cal hidratada e o possível efeito de flocculação gerado pelo cálcio. Por outro lado, tem-se que o solo ST exibe o menor ângulo de atrito, seguido, respectivamente, pelos solos TNa, TCAL e TCa.

Comparativamente com os resultados obtidos por Caneschi (2008) em ensaios de resistência à compressão triaxial, onde se observou aumento na coesão e redução no ângulo de atrito em comparação com o solo ST, tem-se que os resultados atuais mostram comportamento inverso. Explicações para essas diferenças podem estar relacionadas a: (i) tempo decorrido entre compactação dos corpos de prova e realização dos ensaios, lembrando-se que os corpos de prova ensaiados neste trabalho são provenientes dos ensaios de percolação em coluna de solo com duração de, aproximadamente, um ano, sendo que, especificamente no caso do solo TCAL, teve-se condições favoráveis para o desenvolvimento de reações pozolânicas, com o consequente ganho significativo de resistência mecânica; (ii) presença de

metais pesados na massa dos corpos de prova, o que pode ter modificado o complexo sortivo do solo no sentido de melhoria de qualidade; e (iii) o fato de os corpos de prova do presente trabalho exibirem, praticamente, 100 % de grau de saturação.

#### 4.4.3 Ensaio de compressão não confinada

A Figura 4-7 apresenta as curvas tensão versus deformação obtidas nos ensaios de compressão não confinada realizados nos corpos de prova dos solos ST, TCa, TNa e TCAL.

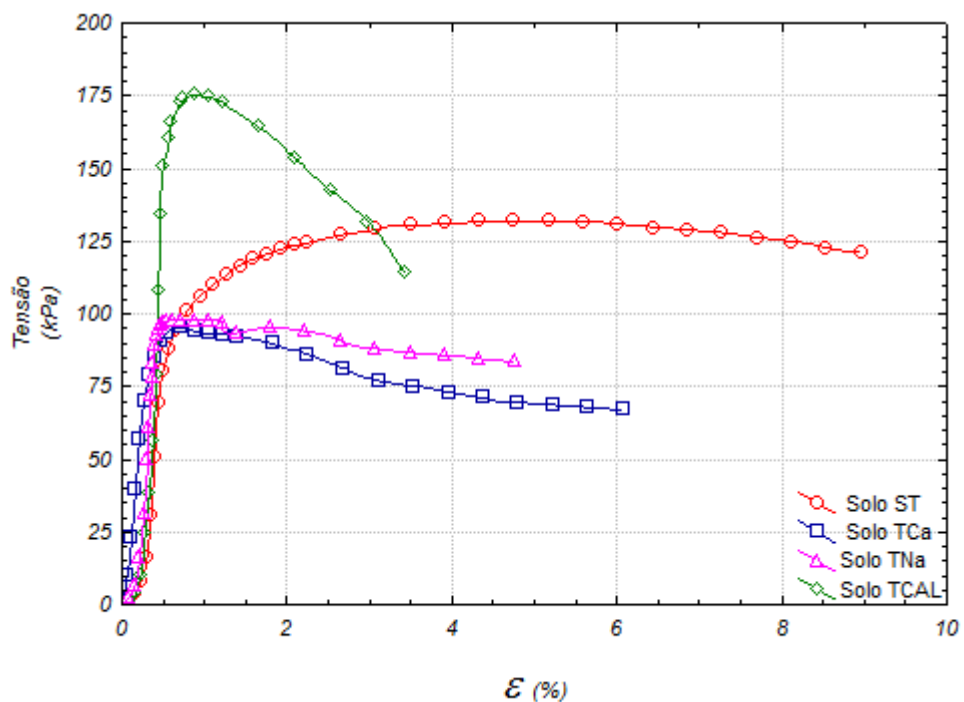


Figura 4-7. Curvas tensão deformação dos solos ST, TCa, TNa e CAL.

Observando-se os resultados apresentados na Figura 4-7, nota-se a ocorrência de comportamento dúctil para os solos ST, TCa, TNa e frágil para TCAL na ruptura, apresentando este último maior tensão de ruptura. Sob esse aspecto, observa-se a ação cimentante da cal hidratada no solo TCAL, através do cume da curva de resistência a ruptura no ensaio de compressão não confinada.

#### 4.4.4 Ensaio com o cone penetrométrico quase-estático

A Figura 4-8 apresenta os resultados dos ensaios penetrométricos realizados nos corpos de prova dos solos ST, TCa, TNa e TCAL, com descrição gráfica da variação da resistência de ponta com a altura de cada corpo de prova.

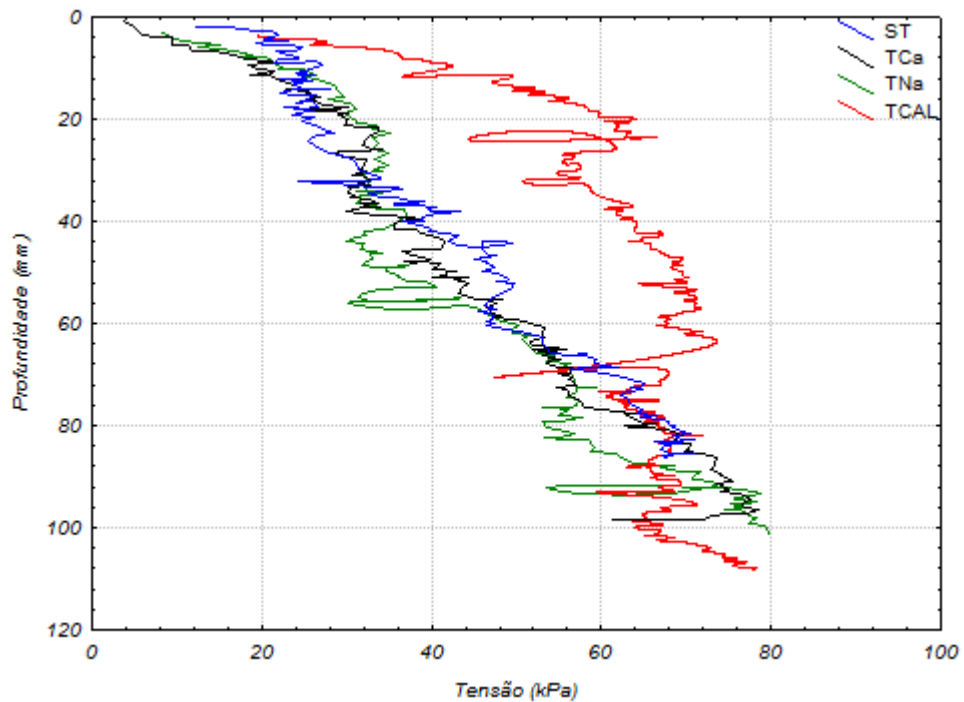


Figura 4-8. Resistência de ponta versus profundidade nos ensaios realizados com o cone penetrométrico em corpos de prova dos solos ST, TCa, TNa e TCAL.

Através dos dados apresentados na Figura 4-8 é possível observar que os solos ST, TCa e TNa apresentam respostas mecânicas relativamente próximas e linearmente crescentes em profundidade, o que caracteriza ausência de melhoria de comportamento mecânico dos tratamentos com os sais empregados comparativamente ao solo ST. Entretanto, com relação ao solo TCAL, observa-se a ocorrência de ganhos significativos de resistência mecânica em relação aos outros tratamentos, atingindo-se um máximo próximo à profundidade média do corpo de prova, com pouca influência posterior da base rígida na mesma, o que reflete o efeito de floculação e cimentação da cal hidratada na produção de um material mais rígido e resistente e, portanto, menos sujeito aos efeitos de borda.

#### 4.4.5 Ensaio de retração

As Figura 4-9 à Figura 4-12 trazem os resultados dos ensaios de retração realizados com corpos de prova dos solos ST, TCA, TNa e TCAL. Os resultados estão expostos por meio de gráficos, apresentando-se à esquerda a variação da altura em relação ao tempo e à direita a variação do diâmetro em relação ao tempo de ensaio. Ressalta-se que as legendas dos gráficos informam em que região dos corpos de prova utilizados nos ensaios de percolação em coluna os corpos de prova dos ensaios de retração foram retirados (base, centro e topo), tendo por referência a entrada do fluxo de contaminante (base) e a sua saída (topo).

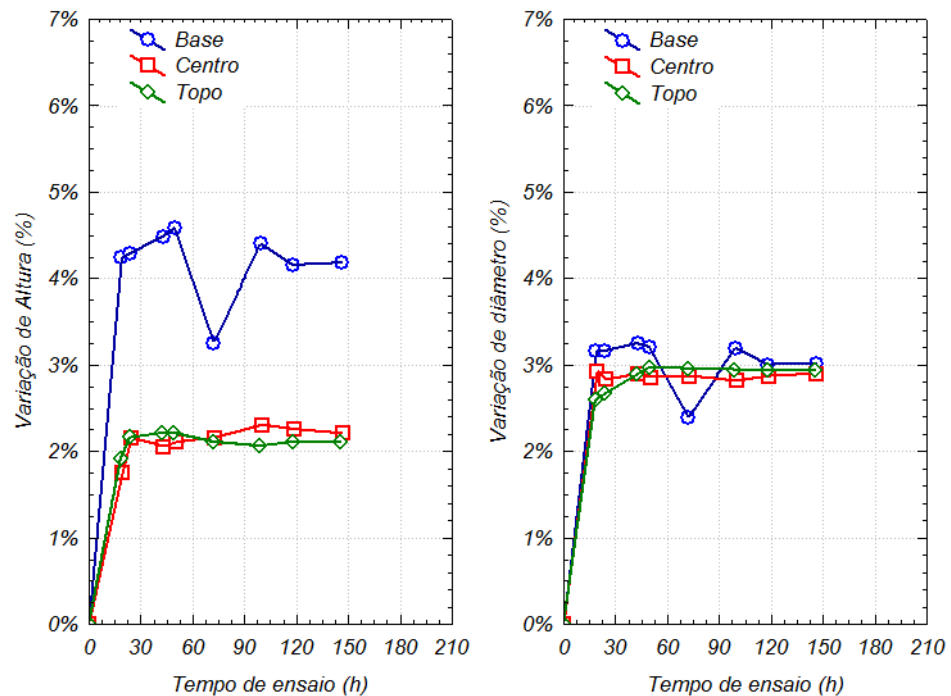


Figura 4-9. Variação de diâmetro e altura do corpo de prova para o solo ST.



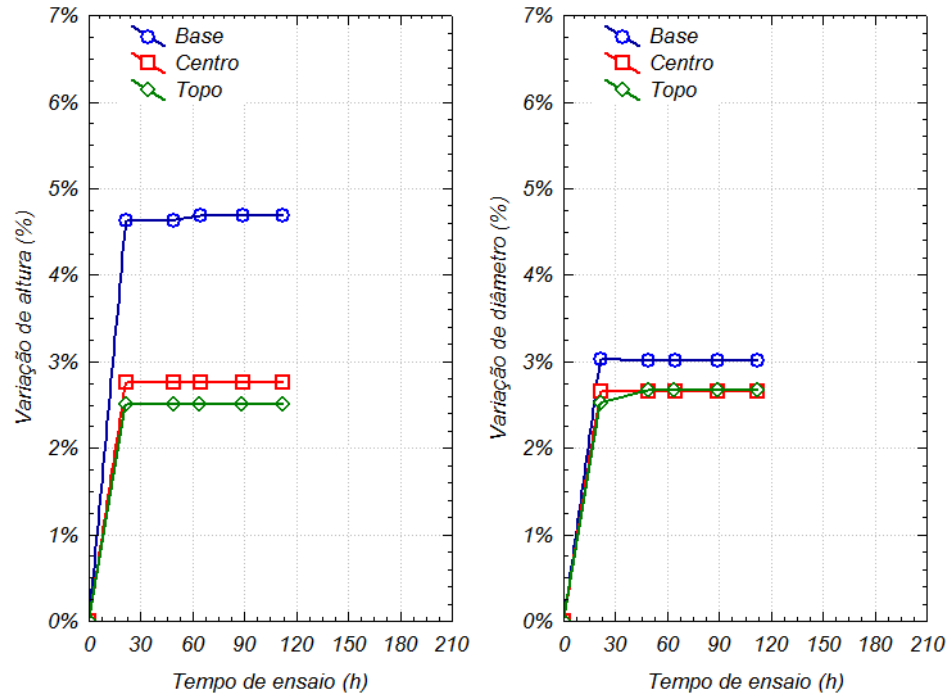


Figura 4-10. Variação de diâmetro e altura do corpo de prova para o solo TCa.

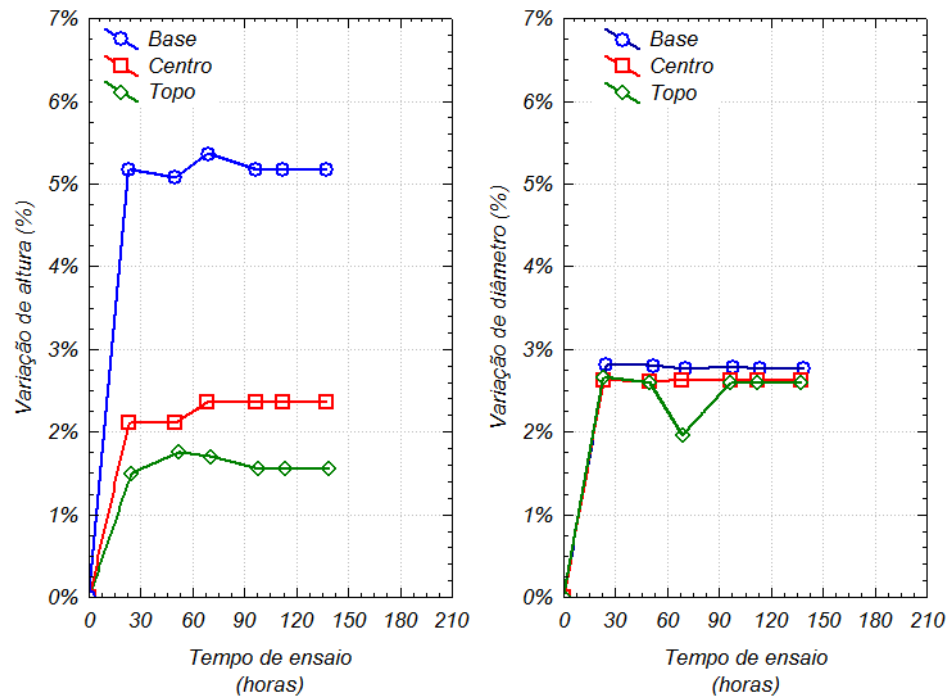


Figura 4-11. Variação de diâmetro e altura do corpo de prova para o solo TNa.

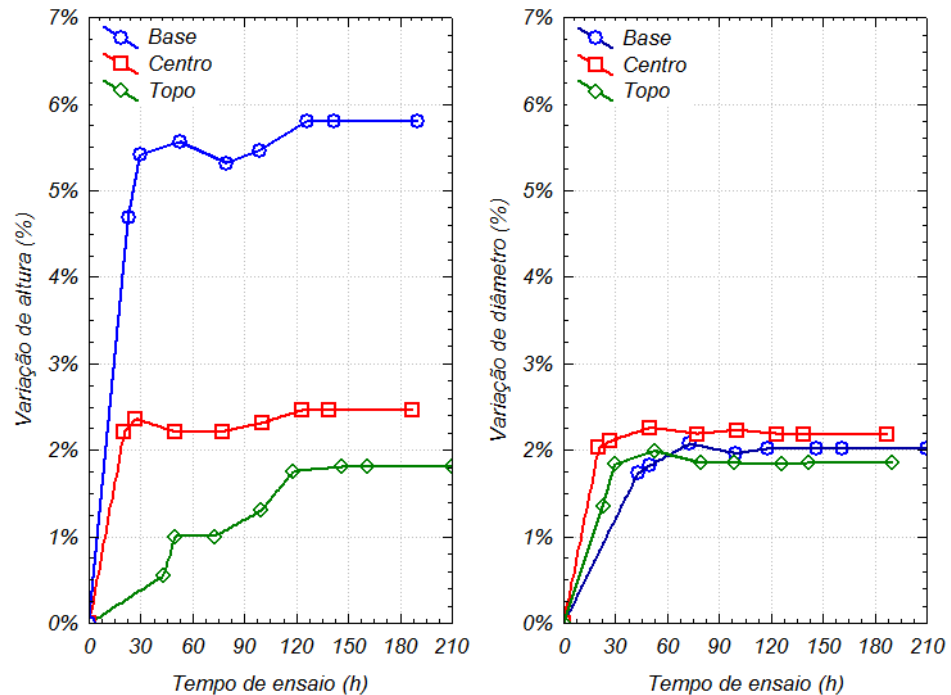


Figura 4-12. Variação de diâmetro e altura do corpo de prova para o solo TCAL.

Iniciam-se as discussões afirmando-se que, provavelmente devido às dimensões dos corpos de prova (5 cm de diâmetro e 2 cm de altura), o tempo em que ocorreu a estabilização do processo de retração foi relativamente pequeno, ou seja, praticamente 24 horas após o início dos ensaios.

Nos resultados apresentados na Figura 4-9, solo ST, é possível observar que a amostra retirada da base do corpo de prova, aquela que recebeu primeiro o fluxo de contaminante, apresentou maior variação dimensional em altura (da ordem de 4 %) que as demais (da ordem de 2 %). Essa observação pode estar relacionada a um possível maior grau de saturação da base do corpo de prova, ou ainda a uma migração de partículas para as partes superiores do corpo de prova, o que pode gerar mais vazios e, conseqüentemente, maior retração. Com relação às variações dimensionais de diâmetro, apesar de mais próximas, aquela que se refere ao corpo de prova obtido da base tem variação superior (da ordem de 3,2 %) em relação às demais (da ordem de 2,8 %).

Na Figura 4-10, solo TCa, repete-se a constatação relativa à Figura 4-9, o que pode confirmar a hipótese levantada anteriormente. Novamente, amostra retirada da base do corpo de prova do ensaio de percolação apresenta maiores

---

variações que os demais, tanto na direção axial, quanto na horizontal, observando-se variações de altura da ordem de 2,5 % a 4,6 % e de diâmetro da ordem de 2,6 % a 3 %. Comportamento semelhante aos já relatados se observa nos dados apresentados na Figura 4-11, solo TNa, com variação na altura na amostra extraída da base da ordem de 2 % a 5 % e no diâmetro da ordem de 2,8 %. Por fim, os resultados apresentados na Figura 4-12, solo TCAL, revelam o mesmo comportamento observado anteriormente, sendo que a amostra proveniente da base apresenta variação de altura da ordem de 1,6 % a 5 % e de diâmetro da ordem de 2 %, necessitando-se, porém, de tempo maior para se atingir a estabilização das variações dimensionais do que os outros tratamentos.

De um modo geral, os resultados obtidos indicam que o solo TCAL foi aquele que apresentou menor variação diametral e pode ser caracterizado como o de melhor resposta nesta característica, mesmo com variações de altura da mesma ordem que os outros.

Ressalta-se a possibilidade de que a compactação dos solos pode produzir um direcionamento dos seus minerais de argila, favorecendo um alinhamento dos mesmos no sentido horizontal, e soma-se a este contexto o fato de que a adição de sais e de cal hidratada pode levar à ocorrência de alterações na espessura das suas duplas camadas difusas e, portanto, interferir nos seus mecanismos de retração. E por último, a possibilidade de baixa umidade relativa no ambiente provocando uma redução muito rápida nas primeiras horas de exposição ambiente, ora não aferida, visto que a temperatura foi mantida por meio de aparelho de ar condicionado que a reduz consideravelmente.

#### **4.5 CONCLUSÕES**

A partir do exposto ao longo desse capítulo é possível concluir que:

- com relação aos parâmetros ótimos de compactação, apenas o solo TCAL não apresentou variação significativa com relação ao solo ST.

---

Por outro lado, a adição dos sais ao solo ST produziu expansão de sua dupla camada difusa, favorecendo a ocorrência de fenômenos de dispersão e o consequente aumento da massa específica aparente seca máxima da ordem de 6,8% e redução do teor de umidade ótimo da ordem de 10,7%;

- o solo TCAL apresentou o melhor desempenho mecânico em todos os ensaios realizados, bem como melhor resposta nos ensaios de cisalhamento direto e de compressão não confinada;
- nos resultados de todos os ensaios realizados, evidencia-se que o tratamento do solo ST com cal hidratada foi responsável por possíveis fenômenos de aglutinação e reações pozolânicas responsáveis pela produção de uma estrutura de solo cimentada e mais rígida que as demais, em especial, considerando-se os resultados dos ensaios com o cone penetrométrico em que se nota uma influência pouco significativa da base do corpo de prova na resistência de ponta; e
- os ensaios de retração não apresentaram diferenças significativas entre os solos, mas, ainda assim, o solo TCAL se mostrou mais eficiente que os demais. Esse comportamento pode estar ligado com o não controle da umidade relativa do ar no ambiente que desenvolveu os ensaios de retração.

---

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALONSO, T. P. **Condutividade hidráulica de solos compactados em ensaios com permeâmetro de parede flexível**. 2005. 120 f. Dissertação de mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-3080: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions**. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770: Solo coesivo - determinação da resistência à compressão não-confinada: método de ensaio**. 4 f. Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo - ensaio de compactação: método de ensaio**. 10 f. Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1986.

CANESCHI, F. P. **Mudanças composicionais químicas e mineralógicas de um latossolo vermelho-amarelo visando a produção de solos modificados**. 2008. 83 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), UFV. Viçosa, Minas Gerais, 2008.

COSTA, O. P. & LOLLO, J. A. Comportamento contrátil de barreiras selantes de solo estabilizado para base de lagoas de tratamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 11, n. 1, p. 115-120. 2007.

DALLA RIVA, R. D. **Efeito das propriedades físicas dos grãos da fração areia de solos arenosos e de agentes de cimentação no comportamento de sistemas empacotados**. 2010. 157 f. Tese doutorado do departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2010.

DANIEL, D. E., KOERNER, R. M. Cover systems. **In: Geotechnical Practice for Waste Disposal**. London: Chapman & Hall, Cap. 18, p. 455-496. 1993.

HEINECK, K. S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis**. 2002. 251 f. Tese de Doutorado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2002.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1969, 553 p.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of Soil Behavior**. John Wiley and Sons, Inc., 1993 London-NY, 2<sup>nd</sup> edition: 422 p.

PORTELINHA, F. H. M. **Efeitos da cal e do cimento na modificação dos**

---

**solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica.** 2008. 161 f. Universidade Federal de Viçosa, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), UFV. Viçosa, Minas Gerais, 2008.

TRINDADE, T. P.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; BARBOSA, P. S. A; SILVA, C. H. C.; MACHADO, C. C. **Compactação dos solos.** Viçosa: Editora UFV, 2008. ISBN: 978-857269-331-8.

WILLIAMS, P. T. **Waste Treatment and Disposal.** Jhon Wiley & Sons, Ltd, 2005, 2<sup>nd</sup> edition. ISBN: 0-470-84912-6.

---

## CAPÍTULO 5. INFLUÊNCIA DO GRADIENTE HIDRÁULICO NA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E NA RETENÇÃO DE METAIS PESADOS

**Resumo.** O presente artigo aborda a caracterização da condutividade hidráulica e do processo de retenção de metais pesados por meio dos resultados de ensaios de percolação em coluna, empregando-se quatro gradientes hidráulicos. O programa de ensaios abrangeu as etapas: (i) obtenção dos parâmetros ótimos de compactação dos solos na energia de compactação do ensaio Proctor normal; (ii) moldagem dos corpos de prova para os ensaios de percolação em coluna; (iii) realização dos ensaios de percolação em coluna. Durante o ensaio, foram anotados o volume percolado e o tempo decorrido, bem como se realizou a coleta do efluente, que foi enviado para a quantificação das concentrações dos metais pesados; (iv) determinação do coeficiente de condutividade hidráulica. Após a análise dos resultados, para fins práticos de engenharia concluiu-se que: (i) nos solos TCa e TNa, os parâmetros ótimos de compactação variaram significativamente em relação ao solo ST, enquanto que no solo TCAL não se observou mudança significativa nos mesmos; (ii) a redução não gradiente hidráulico aplicado resultou em redução no fator de retardamento das curvas de retenção de metais pesados; (iii) o modelo matemático escolhido para a geração das curvas de retenção de metais pesados representou adequadamente o comportamento dos solos analisados; (iv) o solo TCAL apresentou o melhor desempenho no processo de retenção de metais pesados; e (v) o gradiente hidráulico aplicado não influenciou de forma significativa os valores da condutividade hidráulica dos solos.

**Palavras-chave:** gradiente hidráulico, metais pesados, contaminação de solos, condutividade hidráulica, ensaio de percolação em coluna.

---

## 5.1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a qualidade ambiental se torna cada vez mais relevante diariamente no meio em que se vive, em especial no que diz respeito à contaminação de solos e, conseqüentemente, do corpo hídrico com metais pesados.

Estes metais pesados são oriundos de materiais provenientes do acúmulo de objetos, aparelhos e/ou componentes, fontes acumuladoras de energia que são descartados de maneira inadequada sobre a superfície terrestre, desprovidos de qualquer proteção da ação do intemperismo.

Com a preocupação do homem com os impactos ambientais, iniciou-se um processo de prevenção contra a contaminação por meio de técnicas de armazenamento dos materiais descartados que oferecem risco ao ambiente. Esse processo normalmente é realizado sobre o solo, seja ele natural, compactado e/ou melhorado. Com isso, o solo é contaminado por líquidos que, originados dessa massa acumulada, se infiltram.

É claro que o solo é um material poroso e, quanto mais poroso, maior será a facilidade de contaminação. Assim, observa-se a importância do conhecimento da condutividade hidráulica do solo, bem como da variação do gradiente hidráulico frente ao seu processo de retenção de metais pesados, visto que é possível se ter gradientes hidráulicos distintos no campo.

A determinação do coeficiente de condutividade hidráulica é regida pela lei de Darcy, sendo influenciada por fatores, tais como temperatura, viscosidade e densidade do fluido, aceleração da gravidade e coluna d'água acima da camada de solo (gradiente hidráulico), como destaca MIYAZAKI (2005).

Além das condições de contorno inerentes à lei de Darcy (que dizem respeito apenas às características do fluido), quando o assunto é contaminação de solos, existem outros fatores que afetam o processo de retenção de metais pesados. No solo, a massa de contaminante dissolvida no fluido pode se movimentar através das correntes de fluxo ou por processo difusivo-dispersivo no solo, sendo que pode, durante o processo, interagir ou não com o solo através de processos físico-químicos (AREAS, 2006).



Dentro dessa visão, um dos ensaios de interesse para a análise comportamental do solo diante de uma frente contaminante é o ensaio em coluna de solo. Para análise dos resultados obtidos no referido ensaio, existem modelos matemáticos que geram a curva de retenção do metal pesado no solo através de alguns parâmetros.

ZHAO et al. (2009) referem-se a dois modelos que reproduzem curvas de efluentes no ensaio de coluna de solo, regidos pelas Equações 1 e 2:

- Thomas (1994)<sup>1</sup>:

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + e^{(K_t(q_0 m - C_0 v))/Q}} \quad (1)$$

Onde:

$C_t$ : concentração do efluente ( $\text{mg L}^{-1}$ );

$C_0$ : concentração inicial do elemento ( $\text{mg L}^{-1}$ );

$K_t$ : constante de Thomas [ $\text{mL (min mg)}^{-1}$ ];

$q_0$ : máxima quantidade de elemento que pode ser absorvida pelo solo;

$m$ : massa do adsorvente (g);

$v$ : volume de efluente (L); e

$Q$ : vazão ( $\text{mL min}^{-1}$ ).

- Yoon e Nelson (1984)<sup>2</sup>:

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{e^{(K_{YN}t - \tau K_{YN})}}{1 + e^{(K_{YN}t - \tau K_{YN})}} \quad (2)$$

Onde:

$C_t$ : concentração do efluente ( $\text{mg L}^{-1}$ );

$C_0$ : concentração inicial do elemento ( $\text{mg L}^{-1}$ );

$K_{YN}$ : constante ( $\text{L h}^{-1}$ ); e

<sup>1</sup> THOMAS, H.C. Heterogeneous ion exchange in a flow system. *Journal American of Chemical Society*, v. 66, p. 1664–1666, 1994.

<sup>2</sup> YOON Y.H.; NELSON, J.H. Application of gas adsorption kinetics. I. A theoretical model for respirator cartridge service time. *Am. Ind. Hyg. Assoc.*, v. 45, p. 509–516, 1984.

$\tau$ : tempo necessário para se atingir 50 % da curva do ensaio de coluna (h).

Segundo Shackelford (1994<sup>3</sup>, 1995<sup>4</sup>) apud Nascentes (2006) e Van Genuchten e Parker (1984), o fator de retardamento é melhor representado pelo cálculo da área branca acima da curva de retenção ou eluição ou de saída, conforme ilustra a Figura 5-1.

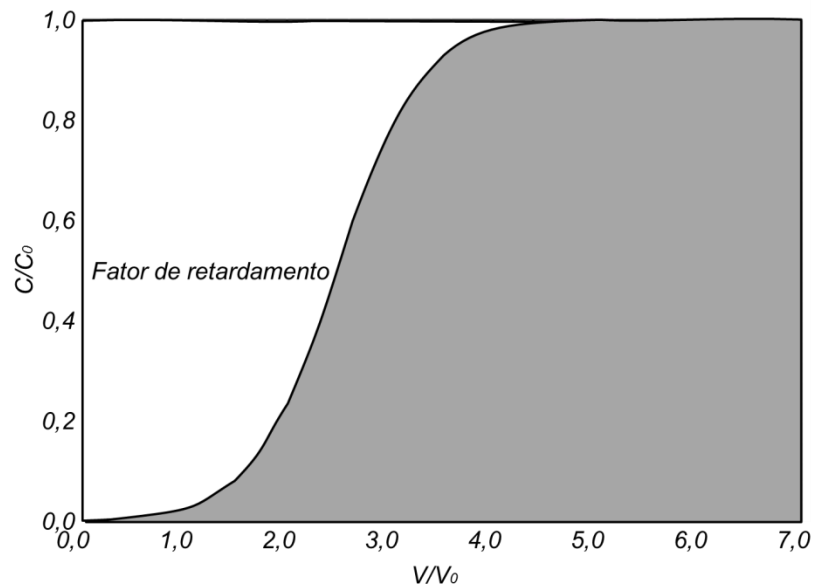


Figura 5-1. Modelo de curva de retenção.

Corriqueiramente, o solo utilizado como base do local de deposição de resíduos, ou seja, para a construção de elementos conhecidos como barreiras selantes ou liners, é um material de granulometria fina, de baixo coeficiente de condutividade hidráulica. Há, ainda, o desejo que seja um solo de grande capacidade de absorção/retenção de metais pesados em sua massa. Para encontrar solos que atendam a esses requisitos, é comum caracterizá-los através de resultados de ensaios de condutividade hidráulica ou condutividade hidráulica e ensaios em coluna, em geral, realizados em equipamentos de laboratório que empregam gradientes hidráulicos relativamente baixos e que,

<sup>3</sup> SHACKELFORD, C.D. Critical Concepts for Column Testing. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE. v. 20, n 10, p. 1804-1828, 1994.

<sup>4</sup> SHACKELFORD, C.D. Cumulative Mass Approach for Column Testing. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE. p. 696-703, 1995.

---

no caso do estudo de contaminantes, demandam tempos excessivos para as suas execuções.

Especificamente, no caso de ensaios em coluna, diferentes gradientes hidráulicos podem ser utilizados, com justificativas distintas. Pacheco e Silva (2005), Boff (1999), Leite (2001) e Basso (2003) trabalharam com pressão de ar comprimido de 76 kPa (gradiente hidráulico de 68), justificando esse número por ser uma pressão representativa de barreiras selantes de aterros sanitários (50 – 100 kPa). Yong (2001) utilizou, em seu trabalho, um gradiente hidráulico em torno de 55, com justificativa de redução do tempo do ensaio de lixiviação por meio de coluna de solo. Por outro lado Alves (2005) utilizou gradiente hidráulico de 24, tomando como base as recomendações da ASTM D 4874 (1995).

Considerando a literatura consultada, entende-se que há interesse em se caracterizar a condutividade hidráulica e o processo de retenção de metais pesados através dos resultados de ensaios de percolação em coluna realizados em condições tais como se relatou no parágrafo anterior, bem como a realização dos ensaios em períodos de tempo menores. No presente trabalho, foram adotados quatro gradientes hidráulicos distintos e uma solução única multiespécie de contaminantes aplicada aos solos em estudo.

## **5.2 MATERIAIS**

### **5.2.1 Solo**

Para realização deste estudo, trabalhou-se com um solo residual maduro de gnaise, classificado pedologicamente como Latossolo Vermelho-Amarelo e geotecnicamente como A-7-5 (Sistema TRB), CH (Sistema USC) e LG' (Metodologia MCT), de grande ocorrência no território brasileiro, sobretudo na Zona da Mata Norte de Minas Gerais, e aqui denominado solo ST. Para a produção dos solos modificados, foram utilizados cal hidratada no teor de 2% (solo TCAL) e cloretos de cálcio (Solo TCa) e de sódio (solo TNa) nos quantitativos de 1% em relação à massa de solo seco, segundo método descrito no Capítulo 2.

### 5.2.2 Solução contaminante

A solução contaminante multiespécie definida no Capítulo 3 foi utilizada nos ensaios de percolação em coluna, nas concentrações de 0,9, 101,2, 14,9, 10,1 e 35,6 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente, para os metais Cd, Mn, Ni, Pb e Zn.

### 5.2.3 Equipamento de percolação em coluna

Para a realização dos ensaios de percolação em coluna, utilizou-se o equipamento exposto na Figura 4-1, descrito no Capítulo 2. O equipamento é constituído basicamente por um painel de controle, um conjunto de células de interface e um conjunto de permeâmetros interligados por tubos flexíveis.

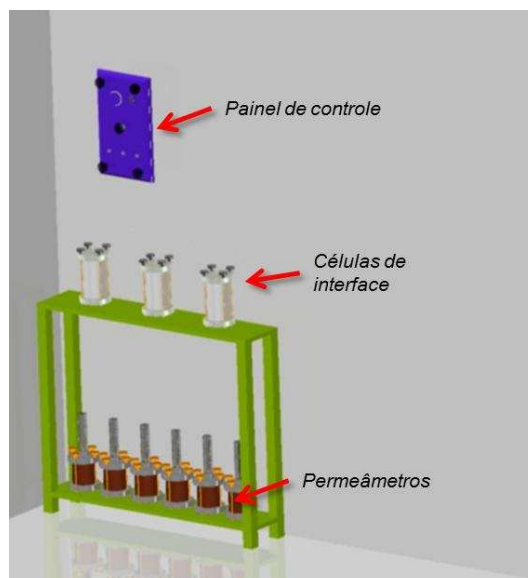


Figura 5-2. Equipamento de percolação em coluna.

O equipamento funciona basicamente por ar comprimido (alimentado por um compressor de ar), que pressuriza as células de interface, a fim de produzir o gradiente hidráulico desejado para promover o fluxo da solução contaminante multiespécie nos corpos de prova localizados nos permeâmetros. Após percolação, o líquido é retido nos tubos de vidro graduado na parte superior, onde se faz a leitura do volume percolado e a coleta do efluente para análises posteriores.

---

## **5.3 MÉTODOS**

Primeiramente, foram obtidos os parâmetros ótimos de compactação dos solos para a energia do Proctor normal segundo a NBR 7182 (ABNT, 1986), com posterior moldagem dos corpos de prova a serem utilizados nos ensaios de percolação em coluna sob o efeito de gradientes hidráulicos diferentes.

### **5.3.1 Ensaios de percolação em coluna realizados sob gradientes hidráulicos diferentes**

Nos ensaios de percolação em coluna foram empregados os gradientes hidráulicos de 87, 66, 44 e 15, com a finalidade de se analisar a influência dos mesmos nos resultados obtidos.

Todos os corpos de prova dos solos ST, TCa, TNa e TCAL foram compactados na energia do ensaio Proctor normal, segundo as recomendações da NBR 7182 (ABNT, 1986), diretamente nos cilindros de PVC, que são parte integrante do sistema de percolação em coluna utilizado neste trabalho. Ressalta-se que na compactação dos corpos de prova foram adotados como referência os parâmetros ótimos de compactação obtidos pelas curvas de compactação de cada solo para a energia do Proctor normal, segundo as recomendações da NBR 7182 (ABNT, 1986).

Para cada solo, foram moldados quatro corpos de prova, sendo cada um deles submetido a um gradiente hidráulico específico, totalizando então dezesseis corpos de prova.

Após a moldagem dos corpos de prova, realizou-se a montagem do equipamento, incluindo-se nesta etapa a vedação do conjunto com as tampas de base e topo, ligação do conjunto inferior (permeâmetro) com o superior (interface) através de tubos flexíveis e enchimento dos compartimentos de pressurização com água destilada. Em seguida, fez-se aplicação das pressões de ar comprimido, de modo a se reproduzirem os gradientes hidráulicos adotados.

A partir desse instante, tomaram-se cuidados no sentido de se proporcionar uma climatização adequada do ambiente de experimentação, sem

---

variações significativas de temperatura durante o intervalo das leituras. Para tal tarefa, foi instalado dentro do ambiente um termômetro, uma aquisição de dados e um microcomputador para registrar leituras periódicas de temperatura.

Foram realizados, também, a medição e o registro do volume de água percolada diariamente, até o momento da estabilização de fluxo. Após verificar-se a ocorrência da estabilização de fluxo, a água destilada foi substituída pela solução multiespécie de cinco metais pesados nas concentrações adotadas.

Deste ponto em diante, além da medição e registro do volume do líquido percolado bem como do intervalo de tempo entre as medições, realizou-se o acondicionamento do percolado em pequenos tubos, que foram encaminhados ao Laboratório de Absorção Atômica do Departamento de Solos da UFV, para medição da concentração de cada metal pesado no líquido. Esse procedimento perdurou até o momento em que a razão entre as concentrações de saída e de entrada se tornou próxima à unidade para, pelo menos, um dos cátions em estudo. Justifica-se este procedimento, pois o tempo de ensaio estava se prolongando para mais de doze meses e para sua conclusão seriam necessários, aproximadamente, mais doze meses, o que ultrapassaria o prazo para a conclusão do presente estudo.

Em seguida, na fase de análise dos resultados, geraram-se as curvas de regressão com o emprego da Equação 1, por meio de processo iterativo, na busca de se obter a melhor correlação possível variando-se apenas a constante de Thomas ( $K_t$ ) e a quantidade máxima de elemento que podia ser absorvida pelo solo ( $q_0$ ). As demais variáveis foram calculadas com as características individuais de cada corpo de prova. A seguir, calculou-se o fator de retardamento das curvas de retenção através da técnica de integração da equação de cada uma das curvas (SHACKELFORD, 1994), como segue:

- definiu-se o intervalo de integração para todas as equações de 0 a  $6(V/V_v)$ ;
- em seguida, para todos os casos em estudo, calculou-se a integral definida neste intervalo; e
- no cálculo do fator de retardamento, subtraiu-se o valor resultante da integral da área total do gráfico referente a este intervalo.

### 5.3.2 Ensaio de condutividade hidráulica

Através das medições de fluxo realizadas nos ensaios de percolação em coluna de solo, determinou-se o coeficiente de condutividade hidráulica dos solos a cada medição. Dessa forma, obteve-se um banco de dados extenso para os quatro solos ensaiados, sendo que, para cada um deles, calculou-se a média e o desvio padrão, para um intervalo de confiança de 95%.

## 5.4 RESULTADOS

### 5.4.1 Ensaio de compactação

A Tabela 5-1 traz os parâmetros ótimos de compactação, para a energia do Proctor normal, relativo aos solos estudados.

Tabela 5-1. Parâmetros ótimos de compactação do solo ST, TCa, TNa e TCAL

Tratamento	$\gamma_{dmax}$ (g cm <sup>-3</sup> )	$W_{ót}$ (%)	$e$	$S_r$ (%)
ST	1,38	31,37	1,01	87,0
TCa	1,48	28,03	0,84	90,3
TNa	1,48	28,36	0,85	90,7
TCAL	1,39	31,51	1,00	87,6

Analisando-se os resultados da Tabela 5-1, observa-se que os tratamentos aplicados ao solo ST para a produção dos solos modificados resultaram em aumento significativo da massa específica aparente seca máxima para os solo TCa e TNa (aproximadamente 7%, para ambos os tratamentos), bem como redução do teor de umidade ótimo (aproximadamente 12%), que, possivelmente, devem estar associados a aumentos na espessura da dupla camada difusa das partículas argilosas devido à interação dos íons adicionados ao complexo sortivo do solo, favorecendo os fenômenos de dispersão e, posteriormente, o processo de compactação. Entretanto para o solo TCAL os parâmetros ótimos de compactação praticamente não variaram, confirmando os comportamentos relatado na literatura técnica em processos de estabilização de solos finos com cal hidratada, em especial para pequenos

---

teores deste agente, como se depreende dos trabalhos de Trindade et al. (2008) e Portelinha (2008).

#### **5.4.2 Influência do gradiente hidráulico no processo de retenção de metais pesados**

Neste item, apresentam-se, graficamente, os resultados obtidos, confrontando-se as curvas de retenção de cada metal pesado e de cada solo com diferentes gradientes hidráulicos.

Os gráficos trazem no seu eixo horizontal o volume relativo de poros (relação entre o volume acumulado de líquido percolado e o volume de poros que o corpo de prova apresentava inicialmente) e no seu eixo vertical a concentração relativa, representada pela relação entre a concentração do metal pesado no efluente (líquido coletado após percolação no corpo de prova) e a concentração do mesmo metal na solução contaminante (aquela que fluiu pelo corpo de prova).

É importante enfatizar que não foram geradas expressões matemáticas para todas as curvas, o que impossibilitou o cálculo dos seus fatores de retardamento. De antemão, justifica-se este procedimento pelo fato de que os ensaios se prolongaram por mais de doze meses, mas, em alguns casos, com a geração insuficiente de dados. Informam-se, também, as expressões matemáticas que descrevem o comportamento do solo, no que tange ao processo de retenção de determinado metal pesado sob gradientes hidráulicos específicos, as quais estão expostas no canto inferior direito de cada gráfico. Ressalta-se, ainda, que algumas curvas não alcançaram a concentração relativa de 1, estando bem abaixo desse valor, situação associada aos gradientes hidráulicos menores e, conseqüentemente, o menor volume percolado que os demais.

Na Figura 5-3 apresentam-se os gráficos com as curvas de retenção de cada metal pesado e respectivos gradientes hidráulicos utilizados nos ensaios de percolação em coluna para o solo ST. Ainda, apresentam-se na Tabela 5-2 os dados da análise de regressão e o fator de retardamento das curvas de retenção dos metais para o solo ST.



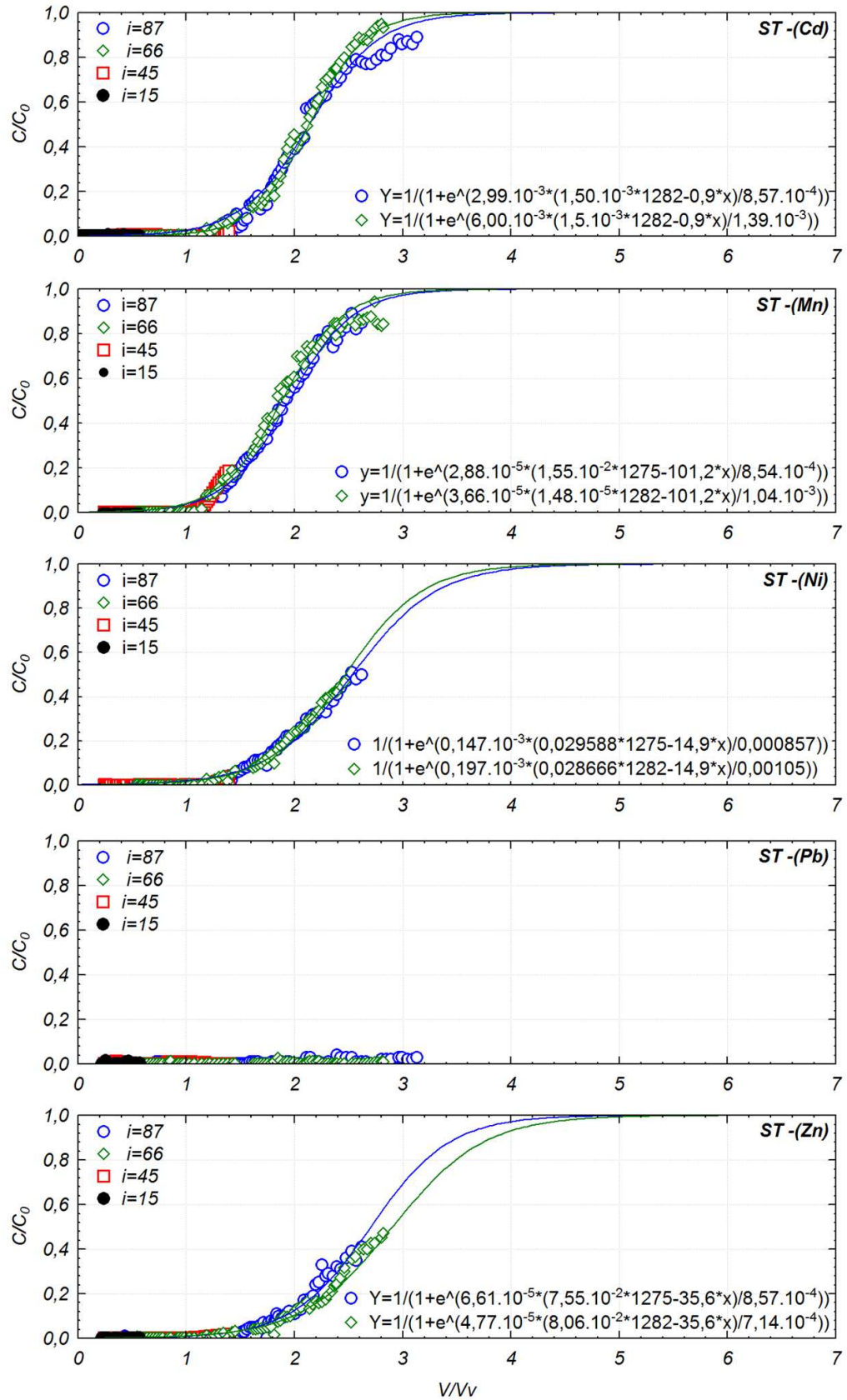


Figura 5-3. Curvas de retenção para o solo ST contaminado com os metais pesados para quatro gradientes hidráulicos.

Tabela 5-2. Análise de regressão e fator de retardamento das curvas de retenção dos metais para o solo ST

Solo/cátion	Gradiente hidráulico	Concentração (mg L <sup>-1</sup> )	Constante de Thomas	r	r <sup>2</sup>	Fator de retardamento
ST/Cd	87,1	0,9	2,957.10 <sup>-3</sup>	0,994	0,987	2,18
	65,6		6,080.10 <sup>-4</sup>	0,998	0,996	2,11
	44,7		-	-	-	-
	15,2		-	-	-	-
ST/Mn	87,1	101,2	2,880.10 <sup>-5</sup>	0,996	0,991	1,95
	65,6		3,660.10 <sup>-5</sup>	0,994	0,988	1,88
	44,7		-	-	-	-
	15,2		-	-	-	-
ST/Ni	87,1	14,9	1,470.10 <sup>-4</sup>	0,993	0,986	2,53
	65,6		1,970.10 <sup>-4</sup>	0,993	0,987	2,47
	44,7		-	-	-	-
	15,2		-	-	-	-
ST/Pb	87,1	10,1	-	-	-	-
	65,6		-	-	-	-
	44,7		-	-	-	-
	15,2		-	-	-	-
ST/Zn	87,1	35,6	6,610.10 <sup>-5</sup>	0,990	0,980	2,71
	65,6		4,770.10 <sup>-5</sup>	0,939	0,882	2,90
	44,7		-	-	-	-
	15,2		-	-	-	-

Analisando-se os resultados relativos ao solo ST (Figura 5-3), as curvas de retenção dos metais Cd e Mn foram aquelas que mais se aproximaram da concentração relativa igual à unidade, ao passo que no caso do Pb, praticamente, não houve aparecimento no percolado. Outra observação é que, para os gradientes hidráulicos menores ( $i=45$  e  $i=15$ ), não houve detecção significativa do contaminante no líquido percolado, o que se justifica pelo baixo volume de solução que fluiu pelos corpos de prova somando-se à facilidade de retenção desse metal pesado na massa de solo.

Na sequência, analisando-se os resultados apresentados na Tabela 5-2, observa-se que o modelo matemático se mostrou eficiente, uma vez que, em geral, os valores de  $r^2$  se aproximaram da unidade. Percebe-se, também, que os fatores de retardamento do solo ST para um mesmo metal não se alteraram significativamente para os gradientes de 87,1 e 65,6. Entretanto, não é possível afirmar nada sobre o Pb, uma vez que não foi possível calcular o fator de retardamento para este metal.

---

Mesmo com valores bem próximos, o fator de retardamento das curvas apresentadas por este solo apresenta uma pequena tendência de redução a medida que se reduz o gradiente hidráulico, com a exceção para a curva do metal Zn que mostrou comportamento inverso. Uma possível justificativa de não se ter detectado Pb no efluente pode ser que esteja sendo retido, o que caracteriza um fator de retardamento elevado.

Na Figura 5-4 têm-se os dados relativos às curvas de retenção dos metais pesados e respectivos gradientes hidráulicos empregados nos ensaios de percolação em coluna para o solo TCa, sendo que na Tabela 5-3 se apresentam os resultados da análise de regressão e o fator de retardamento das curvas de retenção dos metais para o solo TCa.

Para o solo tratado com cloreto de cálcio (TCa), nota-se rapidamente que, além dos dois maiores gradientes, também foi possível obter as curvas de retenção para o gradiente hidráulico igual a 45 (Figura 5-4). Analisando-se os dados apresentados nessa figura, percebe-se, semelhantemente ao solo ST, que as curvas de retenção para os metais Cd e Mn foram aquelas que se aproximaram mais da concentração relativa igual à unidade. Da mesma forma, praticamente, não houve identificação de Pb no percolado, à semelhança do que ocorreu com o solo ST.

Pode-se considerar que as equações de regressão apresentadas nas Figura 5-4 representam adequadamente o comportamento de retenção dos metais pesados no solo TCa, uma vez que os valores de  $r^2$  encontrados são próximos à unidade, como se depreende da Tabela 5-3.

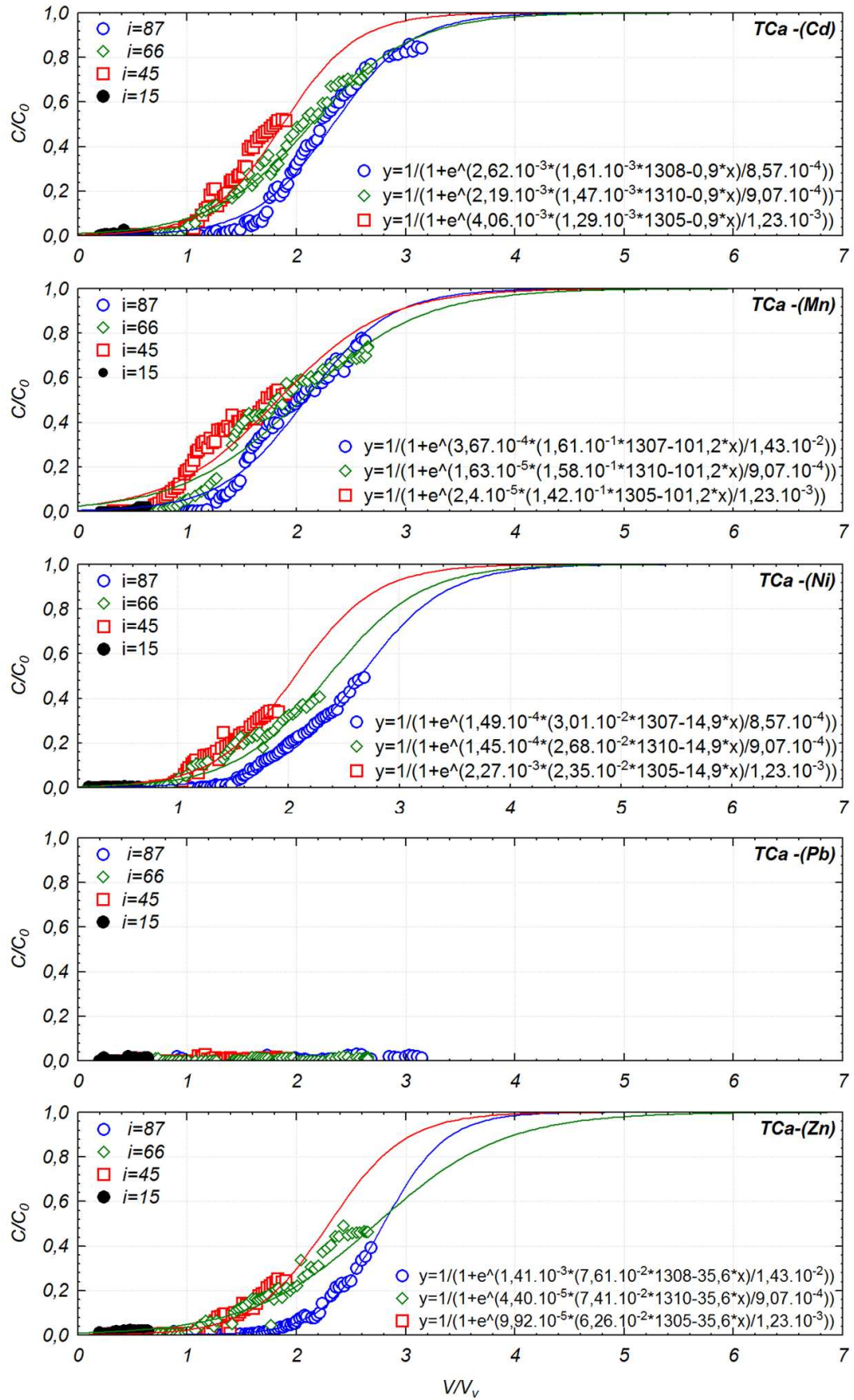


Figura 5-4. Curvas de retenção para o solo TCa contaminado com metais pesados para quatro gradientes hidráulicos.

Tabela 5-3. Análise de regressão e fator de retardamento das curvas de retenção dos metais para o solo TCa

Solo/cátion	Gradiente hidráulico	Concentração (mg L <sup>-1</sup> )	Constante de Thomas	r	r <sup>2</sup>	Fator de retardamento
TCa/Cd	87,1	0,9	2,617.10 <sup>-3</sup>	0,992	0,983	2,34
	65,6		2,185.10 <sup>-3</sup>	0,996	0,993	2,14
	44,7		4,063.10 <sup>-3</sup>	0,992	0,985	1,88
	15,2		-	-	-	-
TCa/Mn	87,1	101,2	3,880.10 <sup>-4</sup>	0,992	0,983	2,08
	65,6		1,940.10 <sup>-5</sup>	0,996	0,993	2,05
	44,7		3,610.10 <sup>-5</sup>	0,992	0,985	1,83
	15,2		-	-	-	-
TCa/Ni	87,1	14,9	1,580.10 <sup>-4</sup>	0,992	0,983	2,65
	65,6		1,840.10 <sup>-4</sup>	0,990	0,979	2,36
	44,7		2,450.10 <sup>-4</sup>	0,992	0,985	2,06
	15,2		-	-	-	-
TCa/Pb	87,1	10,1	-	-	-	-
	65,6		-	-	-	-
	44,7		-	-	-	-
	15,2		-	-	-	-
TCa/Zn	87,1	35,6	1,414.10 <sup>-3</sup>	0,996	0,993	2,80
	65,6		4,400.10 <sup>-5</sup>	0,992	0,984	2,73
	44,7		9,920.10 <sup>-5</sup>	0,992	0,984	2,30
	15,2		-	-	-	-

Com a observação dos dados apresentados na Tabela 5-3, é possível concluir que os fatores de retardamento tendem a se reduzirem com a redução do gradiente hidráulico empregado no ensaio, para um mesmo metal, porém em menor proporção entre os gradientes hidráulicos 87,1 e 65,6 e de forma mais expressiva entre os gradientes 65,6 e 44,7. Essa é uma tendência constatada para todos os metais, com exceção do Pb. A explicação para esse comportamento, provavelmente, está associada ao fato de que gradientes hidráulicos maiores produzem velocidades de fluxo maiores, o que leva a crer que cátions que se prenderam às partículas apenas por processos físicos sejam extraídos mais facilmente da massa de solo. No caso do Pb, o comportamento observado foi similar àquele do solo ST.

Na Figura 5-5 apresentam-se os resultados das curvas de retenção dos metais pesados e respectivos gradientes hidráulicos empregados nos ensaios de percolação em coluna, sendo que na Tabela 5-4 se têm os dados da análise de regressão e o fator de retardamento das curvas de retenção dos metais para o solo TNa.

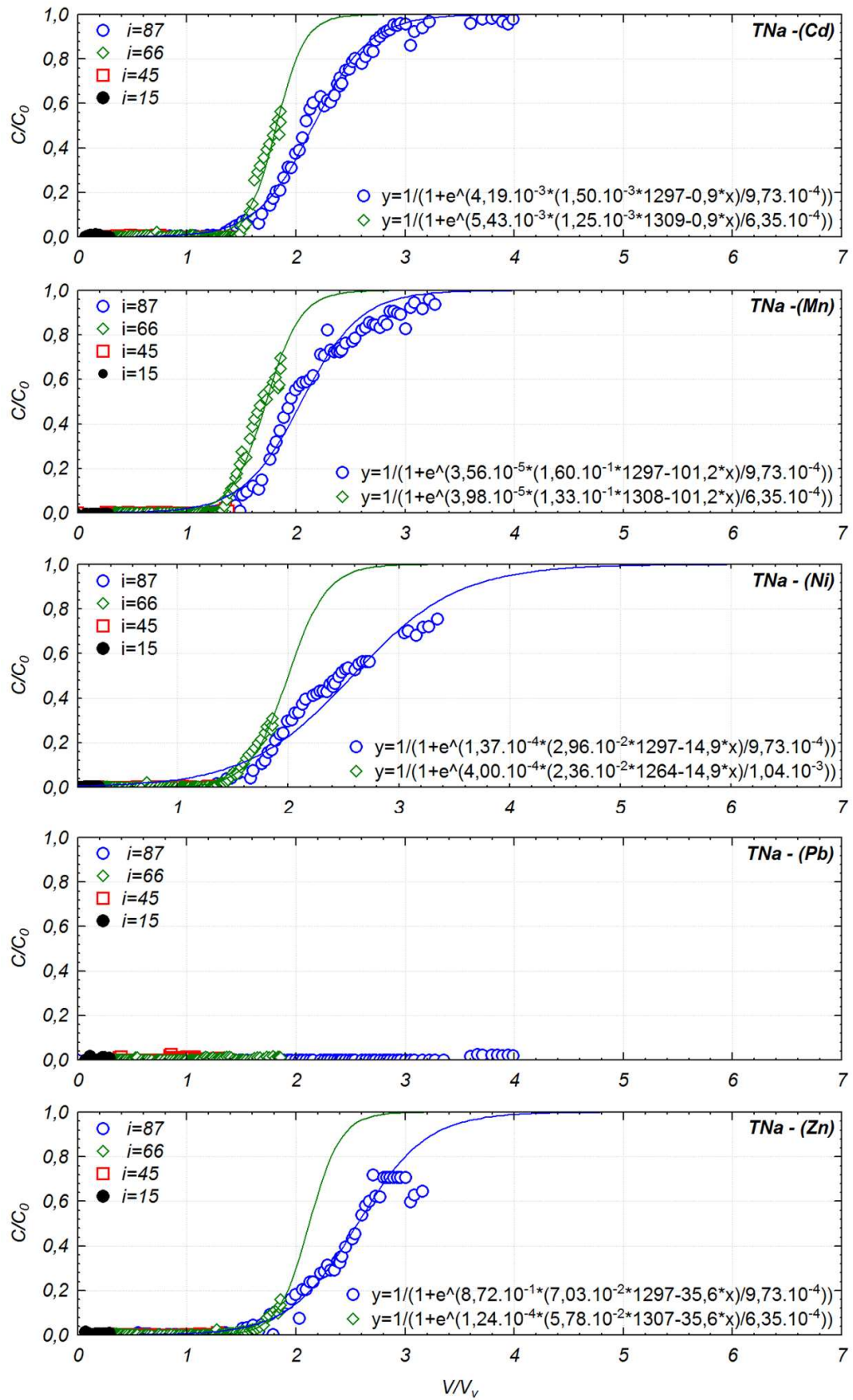


Figura 5-5. Curvas de retenção para o solo TNa contaminado com metais pesados para quatro gradientes hidráulicos.

Tabela 5-4. Análise de regressão e fator de retardamento das curvas de retenção dos metais para o solo TNa

Solo/cátion	Gradiente hidráulico	Concentração (mg L <sup>-1</sup> )	Constante de Thomas	r	r <sup>2</sup>	Fator de retardamento
TNa/Cd	87,1	0,9	4,194.10 <sup>-3</sup>	0,997	0,994	2,16
	65,6		5,434.10 <sup>-3</sup>	0,983	0,967	1,82
	44,7		-	-	-	-
	15,2		-	-	-	-
TNa/Mn	87,1	101,2	3,560.10 <sup>-5</sup>	0,989	0,978	2,05
	65,6		3,980.10 <sup>-5</sup>	0,985	0,971	1,73
	44,7		-	-	-	-
	15,2		-	-	-	-
TNa/Ni	87,1	14,9	2,530.10 <sup>-4</sup>	0,997	0,994	2,58
	65,6		5,370.10 <sup>-4</sup>	0,983	0,967	2,00
	44,7		-	-	-	-
	15,2		-	-	-	-
TNa/Pb	87,1	10,1	-	-	-	-
	65,6		-	-	-	-
	44,7		-	-	-	-
	15,2		-	-	-	-
TNa/Zn	87,1	35,6	8,720.10 <sup>-5</sup>	0,991	0,982	2,57
	65,6		1,240.10 <sup>-4</sup>	0,988	0,977	2,13
	44,7		-	-	-	-
	15,2		-	-	-	-

Analisando-se os resultados apresentados na Figura 5-5, observa-se que foi possível gerar curvas apenas para os dois maiores gradientes hidráulicos. De forma análoga aos demais solos já analisados, os resultados obtidos pelo solo TNa revelam que as curvas de retenção para os metais Cd e Mn foram aquelas que mais se aproximaram da concentração relativa igual a unidade, sendo que não se observou, novamente, a ocorrência de Pb no efluente. Ressalta-se que, nos casos dos metais Ni e Zn, os dados coletados representam apenas uma parcela da curva, sendo possível que, com um maior número de dados, o modelo matemático possa revelar um comportamento mais próximo entre os gradientes usados.

Entende-se que as equações de regressão apresentadas na Figura 5-5 representam de modo adequado o comportamento de retenção no solo dos metais analisados, uma vez que os valores de r<sup>2</sup> encontrados são próximos da unidade, como se apresenta na Tabela 5-4. Em relação aos dados apresentados nesta tabela, nota-se que os fatores de retardamento do solo

---

TNa têm tendência de redução quando se reduz o gradiente hidráulico aplicado, sendo mais expressiva neste solo do que nos anteriormente abordados.

Na Figura 5-6 apresentam-se as curvas de retenção dos metais pesados e respectivos gradientes hidráulicos empregados nos ensaios de percolação em coluna para o solo TCAL.

Observando a Figura 5-6, nota-se que, para nenhum dos metais pesados e independente do gradiente hidráulico, teve-se a ocorrência de contaminante no efluente durante todo o período de ensaio. A partir dessa constatação, conclui-se que os metais pesados adicionados aos corpos de prova neles permaneceram, comprovando que o tratamento do solo ST com cal hidratada produziu um material com melhor capacidade de retenção dos metais pesados estudados.

De um modo geral, analisando-se os gráficos apresentados nas Figura 5-6, observa-se a ocorrência de comportamento similar, sendo que, para cada metal pesado, a redução do gradiente hidráulico levou à redução no fator de retardamento. Entretanto, para o solo TCAL não foi possível gerar o conjunto de curvas de retenção, portanto não sendo possível ter uma conclusão mais concisa.

Entretanto, os corpos de prova do solo TCAL possuem um coeficiente de condutividade hidráulica maior, o que caracteriza um maior volume relativo de poros e, portanto, um maior volume de solução percolado por ele. Essa afirmação realça que o quantitativo de metais retidos neste solo é maior que os demais e, portanto, possuem fator de retardamento muito superior ao dos demais solos aqui estudados, visto que mesmo com maior volume de percolados não foi detectada a presença de metais pesados no efluente.

Quanto ao Pb, existe uma possibilidade de que ele possa estar no efluente e não ter sido detectado por uma possível precipitação do metal nos recipientes, visto que decorreu algum tempo entre a coleta e a realização da leitura de absorção atômica, o que favorece o processo de precipitação.



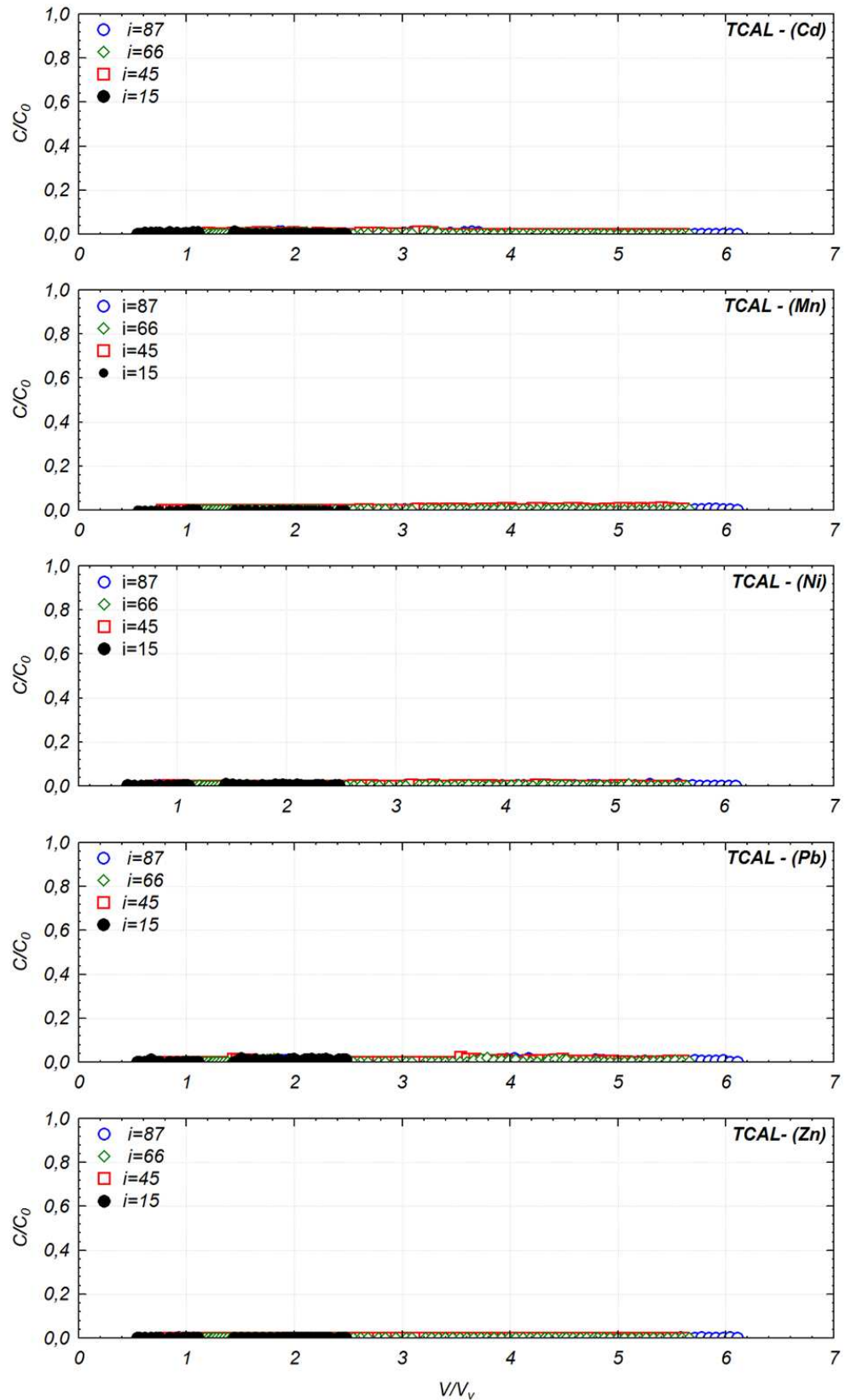


Figura 5-6. Curvas de retenção para o solo TCAL contaminado com metais pesados para quatro gradientes hidráulicos.

### 5.4.3 Influência do gradiente hidráulico no coeficiente de condutividade hidráulica.

A Tabela 5-5 mostra o estudo estatístico dos valores obtidos dos ensaios de condutividade hidráulica para todos os solos estudados, variando os gradientes hidráulicos, apresentando a média geral, os valores limites para um intervalo de confiança de 95%, valores máximos e mínimos da amostra e o desvio padrão da amostra.

Tabela 5-5. Análise estatística dos dados de coeficientes de condutividade hidráulica encontrados por solo considerando a variação do gradiente hidráulico

Solo	Gradiente hidráulico	Média (cm s <sup>-1</sup> )	Confiança -95%	Confiança +95%	Mínimo (cm s <sup>-1</sup> )	Máximo (cm s <sup>-1</sup> )	Desvio padrão
ST	87,1	3,90.10 <sup>-8</sup>	3,80.10 <sup>-8</sup>	4,01.10 <sup>-8</sup>	1,25.10 <sup>-10</sup>	7,96.10 <sup>-8</sup>	8,05.10 <sup>-9</sup>
	65,6	4,36.10 <sup>-8</sup>	4,13.10 <sup>-8</sup>	4,58.10 <sup>-8</sup>	1,80.10 <sup>-10</sup>	1,00.10 <sup>-7</sup>	1,47.10 <sup>-8</sup>
	44,7	5,76.10 <sup>-8</sup>	5,45.10 <sup>-8</sup>	6,08.10 <sup>-8</sup>	-3,57.10 <sup>-11</sup>	1,04.10 <sup>-7</sup>	1,59.10 <sup>-8</sup>
	15,2	4,64.10 <sup>-8</sup>	4,34.10 <sup>-8</sup>	4,94.10 <sup>-8</sup>	-7,17.10 <sup>-9</sup>	1,07.10 <sup>-7</sup>	1,29.10 <sup>-8</sup>
TCa	87,1	4,25.10 <sup>-8</sup>	3,98.10 <sup>-8</sup>	4,52.10 <sup>-8</sup>	5,51.10 <sup>-9</sup>	7,77.10 <sup>-8</sup>	1,15.10 <sup>-8</sup>
	65,6	5,34.10 <sup>-8</sup>	5,07.10 <sup>-8</sup>	5,61.10 <sup>-8</sup>	-4,89.10 <sup>-10</sup>	8,45.10 <sup>-8</sup>	1,80.10 <sup>-8</sup>
	44,7	5,16.10 <sup>-8</sup>	4,81.10 <sup>-8</sup>	5,52.10 <sup>-8</sup>	-2,74.10 <sup>-8</sup>	1,45.10 <sup>-7</sup>	2,38.10 <sup>-8</sup>
	15,2	3,73.10 <sup>-8</sup>	2,74.10 <sup>-8</sup>	4,73.10 <sup>-8</sup>	-4,67.10 <sup>-10</sup>	7,11.10 <sup>-7</sup>	5,88.10 <sup>-8</sup>
TNa	87,1	4,45.10 <sup>-8</sup>	4,26.10 <sup>-8</sup>	4,64.10 <sup>-8</sup>	-6,01.10 <sup>-9</sup>	1,11.10 <sup>-7</sup>	1,52.10 <sup>-8</sup>
	65,6	3,55.10 <sup>-8</sup>	3,33.10 <sup>-8</sup>	3,76.10 <sup>-8</sup>	2,45.10 <sup>-8</sup>	9,19.10 <sup>-8</sup>	9,08.10 <sup>-9</sup>
	44,7	3,64.10 <sup>-8</sup>	3,44.10 <sup>-8</sup>	3,84.10 <sup>-8</sup>	-1,50.10 <sup>-10</sup>	8,61.10 <sup>-8</sup>	1,33.10 <sup>-8</sup>
	15,2	3,13.10 <sup>-8</sup>	3,58.10 <sup>-9</sup>	5,89.10 <sup>-8</sup>	-8,22.10 <sup>-10</sup>	1,27.10 <sup>-6</sup>	1,32.10 <sup>-7</sup>
TCAL	87,1	1,85.10 <sup>-7</sup>	1,72.10 <sup>-7</sup>	1,98.10 <sup>-7</sup>	-9,34.10 <sup>-10</sup>	2,96.10 <sup>-7</sup>	7,17.10 <sup>-8</sup>
	65,6	3,30.10 <sup>-7</sup>	3,09.10 <sup>-7</sup>	3,51.10 <sup>-7</sup>	-3,32.10 <sup>-8</sup>	8,88.10 <sup>-7</sup>	1,49.10 <sup>-7</sup>
	44,7	2,18.10 <sup>-7</sup>	2,04.10 <sup>-7</sup>	2,32.10 <sup>-7</sup>	-4,24.10 <sup>-10</sup>	4,52.10 <sup>-7</sup>	9,71.10 <sup>-8</sup>
	15,2	1,82.10 <sup>-7</sup>	1,69.10 <sup>-7</sup>	1,95.10 <sup>-7</sup>	-1,10.10 <sup>-10</sup>	5,77.10 <sup>-7</sup>	8,01.10 <sup>-8</sup>

Primeiramente, observa-se que os solos ST, TCa e TNa exibem coeficientes de condutividade hidráulica semelhantes, sem variação expressiva entre eles. Portanto, esses tratamentos não exerceram influencia significativa na condutividade hidráulica dos solos, para fins práticos de engenharia. Entretanto, o tratamento do solo ST com cal hidratada produziu um material com coeficiente de condutividade hidráulica cerca de 10 vezes superior aos outros tratamentos. Por outro lado, observa-se que não houve influência significativa do gradiente hidráulico na condutividade hidráulica dos solos analisados, o que implica que a variação deste parâmetro não foi responsável por mudanças estruturais significativas na estrutura de cada solo analisado.

A Figura 5-7 apresenta os coeficientes de condutividade hidráulica dos solos versus os gradientes hidráulicos utilizados no presente estudo, notando-se que a variação entre os valores pode ser considerada desprezível.

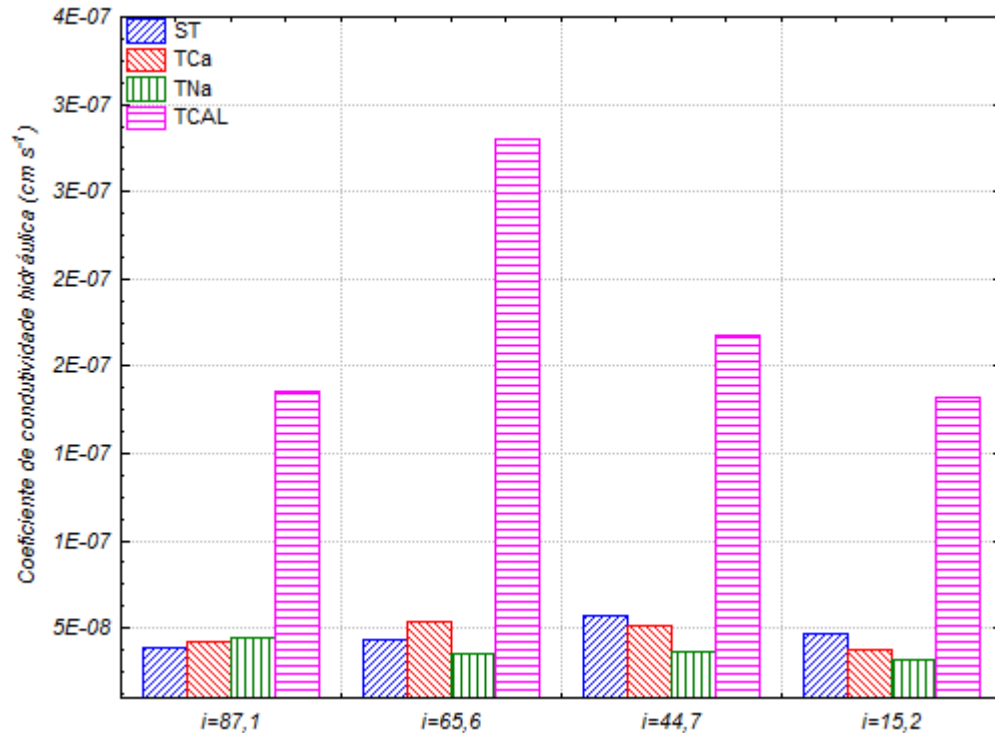


Figura 5-7. Coeficientes de condutividade hidráulica dos solos versus gradientes hidráulicos.

## 5.5 CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados, pode-se concluir que:

- com relação aos parâmetros ótimos de compactação, apenas o solo TCAL não apresentou variação significativa com relação ao solo ST. Por outro lado, a adição dos sais ao solo ST produziu expansão de sua dupla camada difusa, favorecendo a ocorrência de fenômenos de dispersão e o consequente aumento da massa específica aparente seca máxima da ordem de 6,8% e redução do teor de umidade ótimo da ordem de 10,7%;

- 
- a variação do gradiente hidráulico influenciou o processo de retenção de metais pesados nos solos ST, TCa e TNa, observando-se queda no fator de retardamento com reduções nos seus valores;
  - o modelo matemático escolhido representou adequadamente o comportamento dos solos analisados, no que tange ao processo de retenção de metais pesados, com valores de  $r^2$  próximos à unidade;
  - de todos os solos analisados, o solo TCAL apresentou o melhor desempenho no processo de retenção de metais pesados, com fator de retardamento superior aos demais solos estudados; e
  - o gradiente hidráulico aplicado não influenciou de forma significativa os valores da condutividade hidráulica dos solos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, G. P. M. **Capacidade de atenuação do solo de fundo da lagoa anaeróbia da ETE de Passo Fundo/RS**. 2005. 102 f. Dissertação. (Mestre em Engenharia). Faculdade de Engenharia e Arquitetura de Passo Fundo, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 4874: Standard test method for leaching solid material in a column apparatus**. Philadelphia, 1995.

AREAS, V. F. **Estudo experimental e analítico do transporte de contaminantes em meios porosos**. 2006. 107 f. Dissertação. (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo - ensaio de compactação: método de ensaio**. 10 f. Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1986.

BASSO, J. B. **Transporte e retenção de  $K^+$ ,  $Cu^{+2}$  e  $Cl^-$  em uma mistura compactada de solos lateríticos para uso em barreiras selantes: procedimento de homogeneização da mistura e adaptações em equipamento de percolação em colunas**. 2003. 168 f. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

BOFF, F. E. **Avaliação do comportamento de uma mistura compactada de solos lateríticos frente a soluções de  $Cu^{+2}$ ,  $K^+$  e  $Cl^-$  em colunas de percolação**. 1999. 180 f. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.

LEITE, A. L. **Migração de íons inorgânicos em alguns solos tropicais, com ênfase nos processos de sorção e difusão molecular**. 2001. 254 f. Tese. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001.

MIYAZAKI, T. **Water flow in soils**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2005. ISBN: 0-8247-5325-9.

NASCENTES, R. **Estudo da mobilidade de metais pesados em um solo residual compactado**. 2006. 153 f. Tese. (Doutorado em Engenharia Civil / Geotecnia). Universidade Federal de Viçosa, 2006.

PACHECO E SILVA, D. **Influência da contaminação por cloreto de cobre na resistência ao cisalhamento de solos utilizados em liners**. 2005. 136 f. Dissertação. (Mestre em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2005.

PORTELINHA, F. H. M. **Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica**. 2008. 161 f. Universidade Federal de Viçosa, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-

---

Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), UFV. Viçosa, Minas Gerais, 2008.

TRINDADE, T. P.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; BARBOSA, P. S. A; SILVA, C. H. C.; MACHADO, C. C. **Compactação dos solos**. Viçosa: Editora UFV, 2008. ISBN: 978-857269-331-8.

VAN GENUCHTEN, M. T. & PARKER, J.C. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 48(4): 703-708, 1984.

YONG, R. N. **Geoenvironmental engineering: contaminated soils, pollutant fate and mitigation**. Boca Raton, London, New York, Washington, D. C.: CRC Press, 2001. ISBN: 0-8493-8289-0

ZHAO, X., DONG, D., HUA, X., DONG, S. Investigation of the transport and fate of Pb, Cd, Cr (VI) and As (V) in soil zones derived from moderately contaminated farmland in Northeast China. **Journal of Hazardous Materials**. 2009 doi:10.1016/j.jhazmat.2009.05.026, p 8.

---

## **CAPÍTULO 6. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ADSORÇÃO DOS SOLOS PARA METAIS PESADOS**

**Resumo.** Este artigo tem o objetivo avaliar a capacidade de retenção de metais pesados dos solos, bem como avaliar a forma de ligação que existe entre os cátions e as suas partículas coloidais. O programa de estudo englobou as etapas: (i) determinação dos parâmetros ótimos de compactação dos solos; (ii) moldagem dos corpos de prova nos permeâmetros; (iii) produção da solução multiespécie dos metais pesados; (iv) realização dos ensaios de percolação em coluna; e (v) determinação dos metais pesados dos corpos de prova por extração sequencial. Os resultados obtidos permitiram concluir que: (i) os solos TCa e TNa apresentaram comportamento semelhante àquele do solo ST, demonstrando que os tratamentos não propiciaram ganho na capacidade de retenção de metais pesados; (ii) as camadas de topo (camadas 1) dos corpos de prova ensaiados apresentaram quantitativos de metais pesados significativamente menores que as demais; (iii) os resultados sugerem fortemente que o potencial de adsorção do solo TCAL está diretamente relacionado com o seu pH, que é significativamente mais elevado; nesta situação os metais pesados são adsorvidos especificamente e detectados nas fases 3 e 4 do processo de extração sequencial.

**Palavras-chave:** metais pesados, contaminação de solo, extração sequencial.

### **6.1 INTRODUÇÃO**

Várias são as pesquisas realizadas, visando entender o comportamento de metais pesados nos solos. Tais trabalhos são realizados, tanto no sentido de remediação quanto na capacidade de retenção dos solos. No Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), por exemplo, tem-se abordado esse tema, podendo-se referir aos estudos de Trindade (2006), Nascentes (2006) e Velten (2008).

O acúmulo de contaminantes na matriz de um solo é um tema de abordagem complexa, da qual fazem parte inúmeras variáveis (tipo de solo,

---

regime de chuvas, pH do solo, temperatura dentre outros), onde o comportamento está diretamente ligado ao fluxo dos fluidos contaminantes em sua massa.

Sucintamente, pode-se afirmar que a contaminação de solos por metais pesados depende dos mecanismos de interação solo – contaminante, bem como dos processos físicos – químicos que ocorrem e, em algumas situações, dos processos biológicos.

O processo de transporte de contaminantes em meios porosos pode ser dividido em dois grupos, aqueles responsáveis pelo fluxo de materiais e os da fonte de contaminação, sendo que para o problema do movimento de contaminante há que se considerar o transporte de massa (físico), o processo de transferência de massa (químico) e o processo biológico (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1990). Segundo essa organização, o transporte físico de massa envolve processos distintos de advecção, difusão e dispersão, que são responsáveis por levar a toda a parte da massa de solo os cátions em concentrações iguais. Aqui a forma de ligação do cátion à partícula de solo é extremamente fraca, podendo ser removida ou deslocada com relativa facilidade. Pode-se referir que:

- a advecção é a forma de transporte de massa da fonte considerada mais importante. Tal movimento depende, basicamente, do fluxo de água (solvente) na matriz de solo, ou seja, ele acompanha a direção e velocidade do fluxo existente;
- a difusão ocorre pelo espalhamento do contaminante, devido à diferença de concentração do poluente. Em linhas de importância de mecanismos de atenuação de contaminantes, pode ser considerada de segunda ordem; e
- a dispersão é o processo referido como o fenômeno que causa uma mistura do fluido. Pode ser entendido como sendo um mecanismo de advecção sem fluxo definido (em pequena escala). Tal processo reduz a concentração do poluente na pluma de contaminação.



---

Segundo o National Research Council (1990), a transferência química de massa no perfil de solo engloba os seguintes tipos de transporte:

- decaimento radioativo, que é entendido como sendo o declínio irreversível da atividade radioativa, por meio de reações nucleares;
- sorção, que compreende o processo pelo qual o contaminante é retirado da solução poluente e aderido à superfície do mineral de solo, normalmente mineral de argila. O termo sorção é geral e engloba os termos adsorção, absorção, troca iônica e dessorção, sendo de grande importância, uma vez que reduz a taxa dos colóides que estão em movimento. A sorção pode ser não-específica quando interação entre os elementos é de natureza eletrostática, de caráter mais fraco ou específica quando a interação entre os elementos é realizada por meio de ligações covalentes ou iônicas, de caráter mais forte;
- dissolução e precipitação, que são os processos de adição ou remoção de novos contaminantes por reações de dissolução ou criação de vários sólidos. A precipitação do contaminante é importante para o controle de sua concentração na solução. Por sua vez, a concentração da solução é principalmente controlada pela fonte de contaminação e/ou pela frente de reação;
- reações ácido-base, que são aquelas que envolvem a transferência de prótons. São importantes por controlarem, indiretamente, o transporte do contaminante, haja vista que o mesmo é função do pH da solução;
- complexação, entendida como a combinação de cátions e ânions simples em espécies aquosas mais complexas. É um importante mecanismo que atua aumentando a solubilidade de metais na água, ou seja, quanto maior a complexação, maior é a quantidade de um sólido dissolvido na água;
- hidrólise e substituição, que são reações de transferências abióticas que afetam os contaminantes orgânicos na água. Tal mecanismo torna um composto orgânico mais susceptível à biodegradação;

- redução e oxidação, que são reações que envolvem a transferência de elétrons, incluindo elementos com mais de um estado de oxidação; são de grande importância no retardo do espalhamento da contaminação através da precipitação de metais.

E finalizando os processos de transferência de massa em meios porosos, ressalta-se o processo por meio biológico. Esse mecanismo consiste em reações de degradação de compostos orgânicos em que a taxa é controlada pela abundância de micro-organismos e condições de redução.

Diante do exposto, este capítulo tem o objetivo de avaliar a capacidade de retenção de metais pesados dos solos estudados, bem como avaliar a forma de ligação que existe entre os cátions e as partículas de solo.

## **6.2 MATERIAIS**

### **6.2.1 Solo**

Para realização deste estudo, trabalhou-se com um solo residual maduro de gnaiss, classificado pedologicamente como Latossolo Vermelho-Amarelo e geotecnicamente como A-7-5 (Sistema TRB), CH (Sistema USC) e LG' (Metodologia MCT), de grande ocorrência no território brasileiro, sobretudo na Zona da Mata Norte de Minas Gerais, e aqui denominado solo ST. Para a produção dos solos modificados, foram utilizados cal hidratada no teor de 2% (solo TCAL) e cloretos de cálcio (Solo TCa) e de sódio (solo TNa) nos quantitativos de 1% em relação à massa de solo seco, segundo método descrito no Capítulo 2.

### **6.2.2 Solução contaminante**

A solução contaminante multiespécie definida no Capítulo 3 foi utilizada nos ensaios de percolação em coluna, nas concentrações de 0,9, 101,2, 14,9, 10,1 e 35,6 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente, para os metais Cd, Mn, Ni, Pb e Zn.

### 6.2.3 Equipamento de percolação em coluna

Para a realização dos ensaios de percolação em coluna, utilizou-se o equipamento exposto na Figura 4-1, descrito no Capítulo 2. O equipamento é constituído basicamente por um painel de controle, um conjunto de células de interface e um conjunto de permeâmetros interligados por tubos flexíveis.

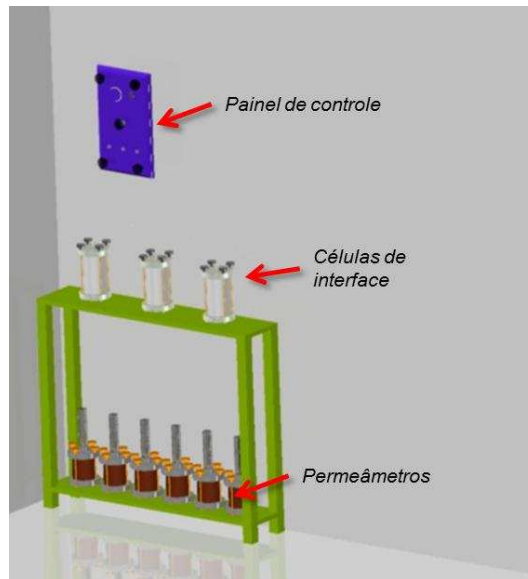


Figura 6-1. Equipamento de percolação em coluna.

O equipamento funciona basicamente por ar comprimido (alimentado por um compressor de ar), que pressuriza as células de interface, a fim de produzir o gradiente hidráulico desejado para promover o fluxo da solução contaminante multiespécie nos corpos de prova localizados nos permeâmetros. Após percolação, o líquido é retido nos tubos de vidro graduado na parte superior, onde se faz a leitura do volume percolado e a coleta do efluente para análises posteriores.

### 6.3 MÉTODOS

Primeiramente, foram obtidos os parâmetros ótimos de compactação dos solos para a energia do Proctor normal segundo a NBR 7182 (ABNT, 1986), com posterior moldagem dos corpos de prova a serem utilizados nos ensaios de percolação em coluna sob o efeito de gradientes hidráulicos diferentes.

---

Terminado o processo de contaminação dos solos via ensaio de percolação em coluna, as amostras foram retiradas dos permeâmetros e então destinadas aos ensaios de extração sequencial.

A caracterização química e eletroquímica do complexo sortivo dos solos foi realizada segundo os procedimentos preconizados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1997). Os cátions trocáveis  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  foram extraídos em  $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$  e determinados seus quantitativos por espectrometria de absorção atômica. O cátion  $\text{Al}^{3+}$ , extraído por  $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$ , foi determinado volumetricamente por titulação com  $\text{NaOH } 0,025 \text{ mol L}^{-1}$ . A acidez potencial ( $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ) foi determinada via extração com acetato de cálcio  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  a pH 7,0 e posterior titulação com  $\text{NaOH}$ . Os cátions  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  foram extraídos por extrator Mehlich-1 e determinados seus quantitativos por fotometria de chama. A partir dos resultados destas análises, foi possível determinar: (i) a soma das bases trocáveis (SB):  $\text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ; (ii) a capacidade de troca de cátions (CTC):  $\text{SB} + (\text{H}^+ + \text{Al}^{3+})$ ; e (iii) a saturação por bases (V%):  $(\text{SB}/\text{CTC}) \times 100$ .

Para a realização dos ensaios de extração sequencial, empregou-se metodologia baseada naquela sugerida por Egreja Filho (2000) e também adotado por Velten (2008), objetivando entender a natureza das interações dos elementos químicos com os minerais do solo, sobretudo os minerais de argila.

As amostras de solo foram retiradas dos corpos de prova oriundos dos ensaios de percolação em coluna com solução multiespécie (Cd, Pb, Mn, Ni e Zn). Cada corpo de prova foi dividido em três amostras (Figura 6-2), a de topo (1), a de fundo (3) e a intermediária (2). Em seguida, essas amostras foram separadas em sacos plásticos distintos, secas ao ar, destorroadas, homogeneizadas e encaminhadas para o Laboratório de Mineralogia do Departamento de Solos (DPS) da UFV, para a realização dos ensaios de extração seqüencial. Ressalta-se que cada uma dessas amostras foi subdividida em três partes, onde o resultado final do ensaio foi a média dos três valores encontrados.

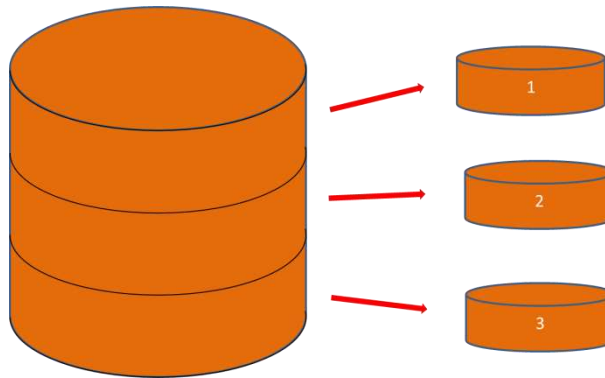


Figura 6-2. Amostras de solos para ensaio de extração sequencial.

Sob essa visão, cada amostra de solo foi submetida a contínuas extrações, com extratores distintos em cada etapa, com poder de extração maior à medida que o processo prosseguia. Dessa forma, o extrator atuou modificando as ligações entre o metal e os minerais do solo, com o intuito de solubilizá-lo e, então, quantificá-lo. A extração foi realizada em quatro etapas, como se ilustra em croqui esquemático apresentado na Figura 6-3.

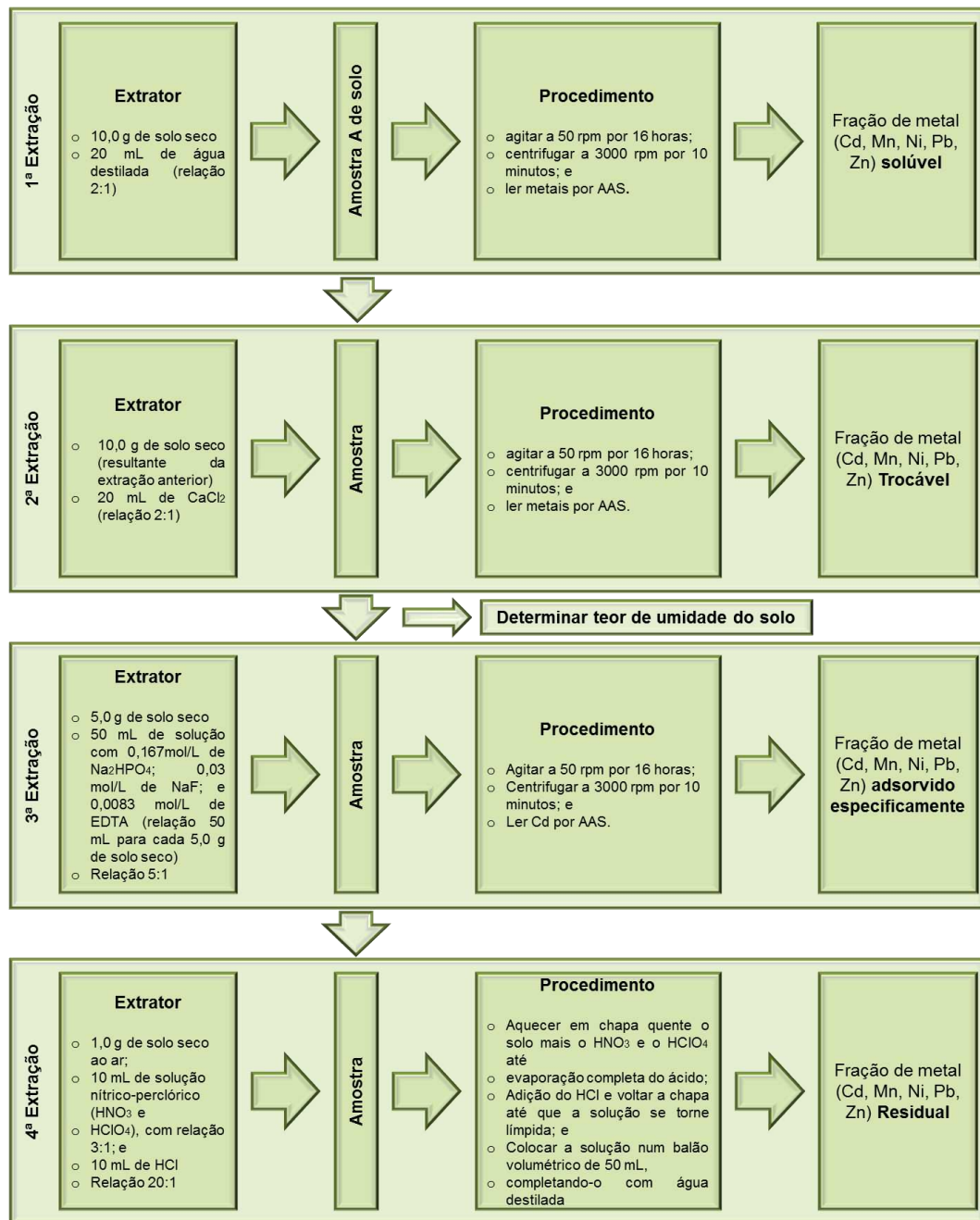


Figura 6-3. Croqui esquemático do processo de extração sequencial modificado de Velten (2008).

Na primeira extração, a água destilada atuou apenas como um agente que lavou o solo e retirou os cátions solúveis presentes na sua matriz.

Na segunda extração, utilizou-se o cloreto de cálcio. Esse composto é um sal solúvel que libera o cátion  $\text{Ca}^{2+}$  em solução, o qual é um cátion divalente e que tem alto poder de adsorção eletrostática pelos minerais presentes no solo. Com isso, os outros metais ou elementos químicos, em especial cátions de metais pesados, que possam estar apenas ligados

eletrostaticamente na superfície do solo (fracamente adsorvidos), são deslocados para a solução pelo íon cálcio e, então, quantificados.

Na terceira extração, definida por Egreja Filho (2000) como um processo que envolve a substituição de ligantes na superfície argilosa, em especial dos óxidos de ferro e alumínio presentes, e formação de complexos mono e binucleares, o EDTA foi adicionado para garantir que o metal extraído fosse mantido em solução, evitando-se a sua precipitação ou readsorção em outra fase. Sua concentração foi baixa, tendo em vista que é um reagente de pouca seletividade, evitando assim que se extraísse metais de outras fases, como destaca Nascentes (2006).

E, por fim, para a determinação da fração residual ou aquela que ficou entranhada no mineral do solo, utilizou-se a digestão com os ácidos nítrico e perclórico, os quais são ácidos fortes. Com isso, foi feita uma abertura da amostra, restando apenas o silicato do material de origem.

## 6.4 RESULTADOS

### 6.4.1 Ensaio de compactação

A Tabela 6-1 traz os parâmetros ótimos de compactação, para a energia do Proctor normal, relativo aos solos estudados.

Tabela 6-1. Parâmetros ótimos de compactação do solo ST, TCa, TNa e TCAL

Tratamento	$\gamma_{dmax}$ (g cm <sup>-3</sup> )	$W_{ót}$ (%)	e	$S_r$ (%)
ST	1,38	31,37	1,01	87,0
TCa	1,48	28,03	0,84	90,3
TNa	1,48	28,36	0,85	90,7
TCAL	1,39	31,51	1,00	87,6

Analisando-se os resultados da Tabela 5-1, observa-se que os tratamentos aplicados ao solo ST para a produção dos solos modificados resultaram em aumento significativo da massa específica aparente seca máxima para os solo TCa e TNa (aproximadamente 7%, para ambos os tratamentos), bem como redução do teor de umidade ótimo (aproximadamente

12%), que, possivelmente, devem estar associados a aumentos na espessura da dupla camada difusa das partículas argilosas devido à interação dos íons adicionados ao complexo sortivo do solo, favorecendo os fenômenos de dispersão e, posteriormente, o processo de compactação. Entretanto para o solo TCAL os parâmetros ótimos de compactação praticamente não variaram, confirmando os comportamentos relatado na literatura técnica em processos de estabilização de solos finos com cal hidratada, em especial para pequenos teores deste agente, como se depreende dos trabalhos de Trindade et al. (2008) e Portelinha (2008).

#### 6.4.2 Ensaio de caracterização química

A Tabela 2-6 traz os resultados da caracterização química dos solos ST, TCa, TNa e TCAL. Ressalta-se que os valores de pH foram medidos em água, na proporção volumétrica de 1:2,5.

Tabela 6-2. Propriedades químicas dos solos ST, TCa, TNa e TCAL

Características do solo		Amostras do solo ST e seus tratamentos				
		ST	TCa	TNa	TCAL	
Química	pH H <sub>2</sub> O	-	5,55	5,73	5,41	8,01
	K <sup>+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0,05	0,05	0,05	0,08
	Na <sup>+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0,07	0,08	20,00	0,06
	Ca <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0,64	11,09	0,49	5,11
	Mg <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0,02	0,00	0,00	0,00
	Al <sup>3+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00
	H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	1,10	1,00	1,30	0,00
	SB	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0,78	11,22	20,54	5,25
	CTC	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0,78	11,22	20,54	5,25
	V %	%	41,5	91,8	94,0	100

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 2-6, infere-se que os valores de pH dos solos TCa e TNa são semelhantes ao do solo ST; entretanto, o solo TCAL apresenta um valor de pH acima dos demais, caracterizando-o como básico. Observa-se que os valores de capacidade de troca catiônica dos solos TCa, TNa e TCAL foram significativamente superiores ao do solo ST, respectivamente, com aumentos da ordem de 14, 26 e 7 vezes.



A baixa CTC do solo ST é explicada pela natureza do seu material, que é caulínico com a presença de óxidos de ferro e de alumínio. Nota-se, ainda, que ele foi o solo que apresentou menor índice de saturação de bases (V), com 41,5%, exibindo os demais valores na faixa de 91% a 100%. Observou-se que a acidez potencial ( $H^+ + Al^{3+}$ ) não variou significativamente entre os solos ST, TCa e TNa, bem como que no solo TCAL esse valor foi  $0,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , o que pode ser justificado pelo fato de não se encontrar  $Al^{3+}$  no mesmo e, devido ao maior quantitativo de hidroxila livre em sua solução, pelo seu maior pH.

#### 6.4.3 Ensaio de extração sequencial

O conjunto de gráficos apresentados desde a Figura 6-4 à Figura 6-8 traz, respectivamente, as concentrações de metal pesado encontrados nos corpos de prova utilizados nos ensaios de percolação em coluna, com quantitativos referentes às camadas individuais e por fase da extração sequencial. A fim de esclarecimento da disposição dos gráficos, tem-se que os da direita revelam as concentrações referentes a cada uma das quatro extrações, sendo que cada barra representa os valores encontrados em camada específica de um dado corpo de prova. Já os da esquerda representam a variação dessa concentração ao longo do corpo de prova (três camadas) em função da etapa da extração sequencial considerada.

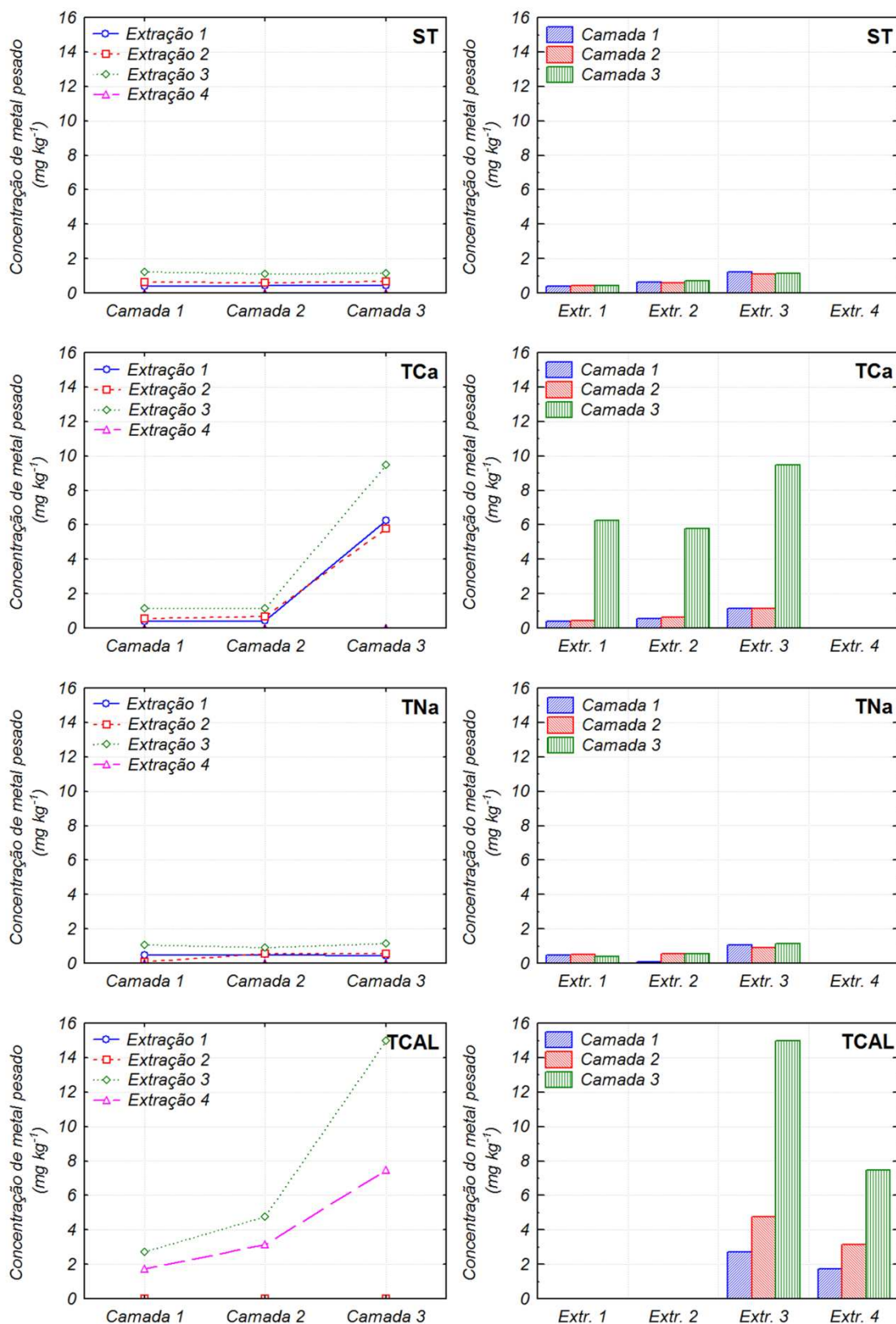


Figura 6-4. Valores de concentração referente às etapas da extração sequencial de amostras dos solos ST, TCa, TCAL e TNa, respectivamente, considerando-se o metal pesado Cd.

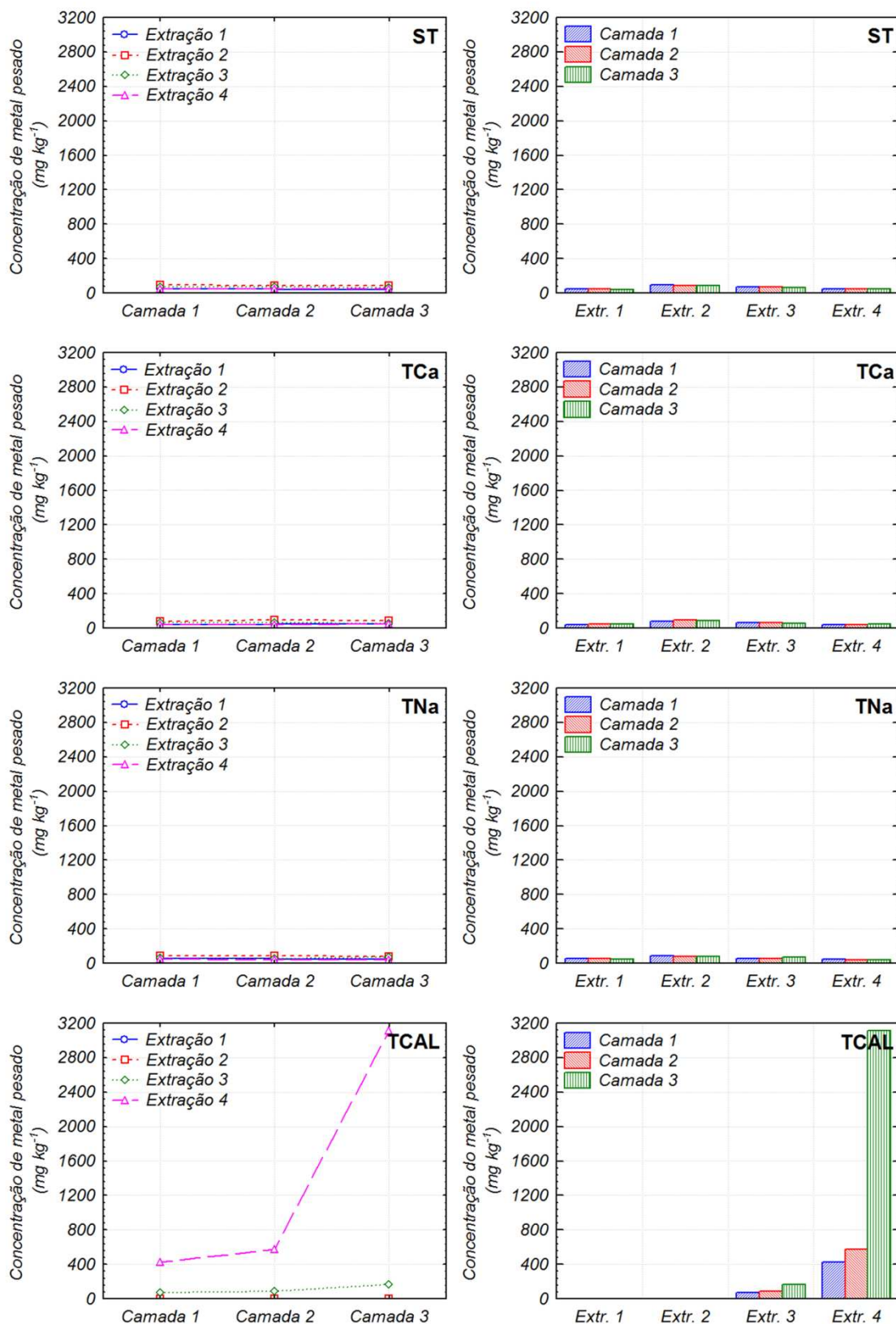


Figura 6-5. Valores de concentração referente às etapas da extração sequencial de amostras dos solos ST, TCa, TCAL e TNa, respectivamente, considerando-se o metal pesado Mn.

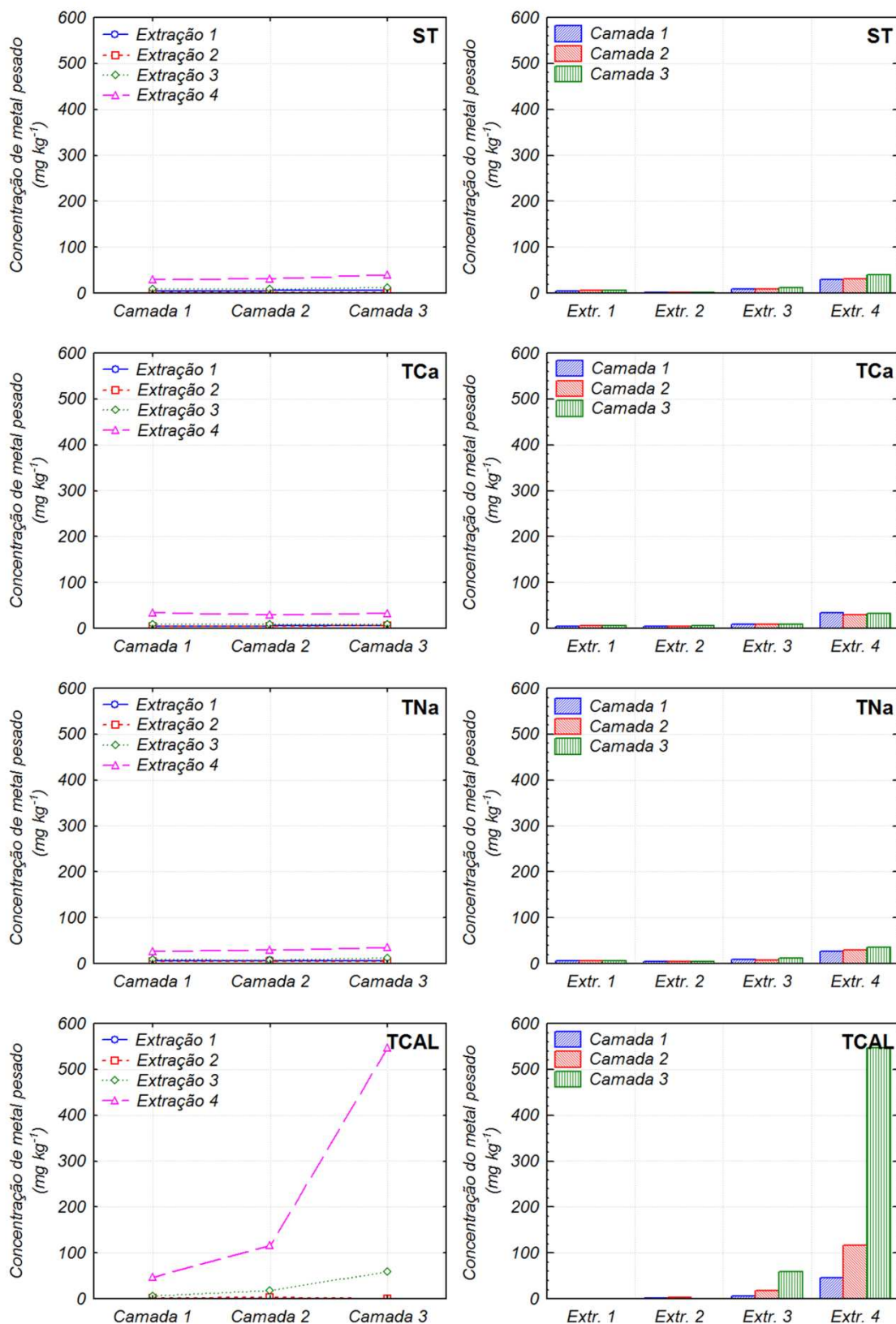


Figura 6-6. Valores de concentração referente às etapas da extração sequencial de amostras dos solos ST, TCa, TCAL e TNa, respectivamente, considerando-se o metal pesado Ni.

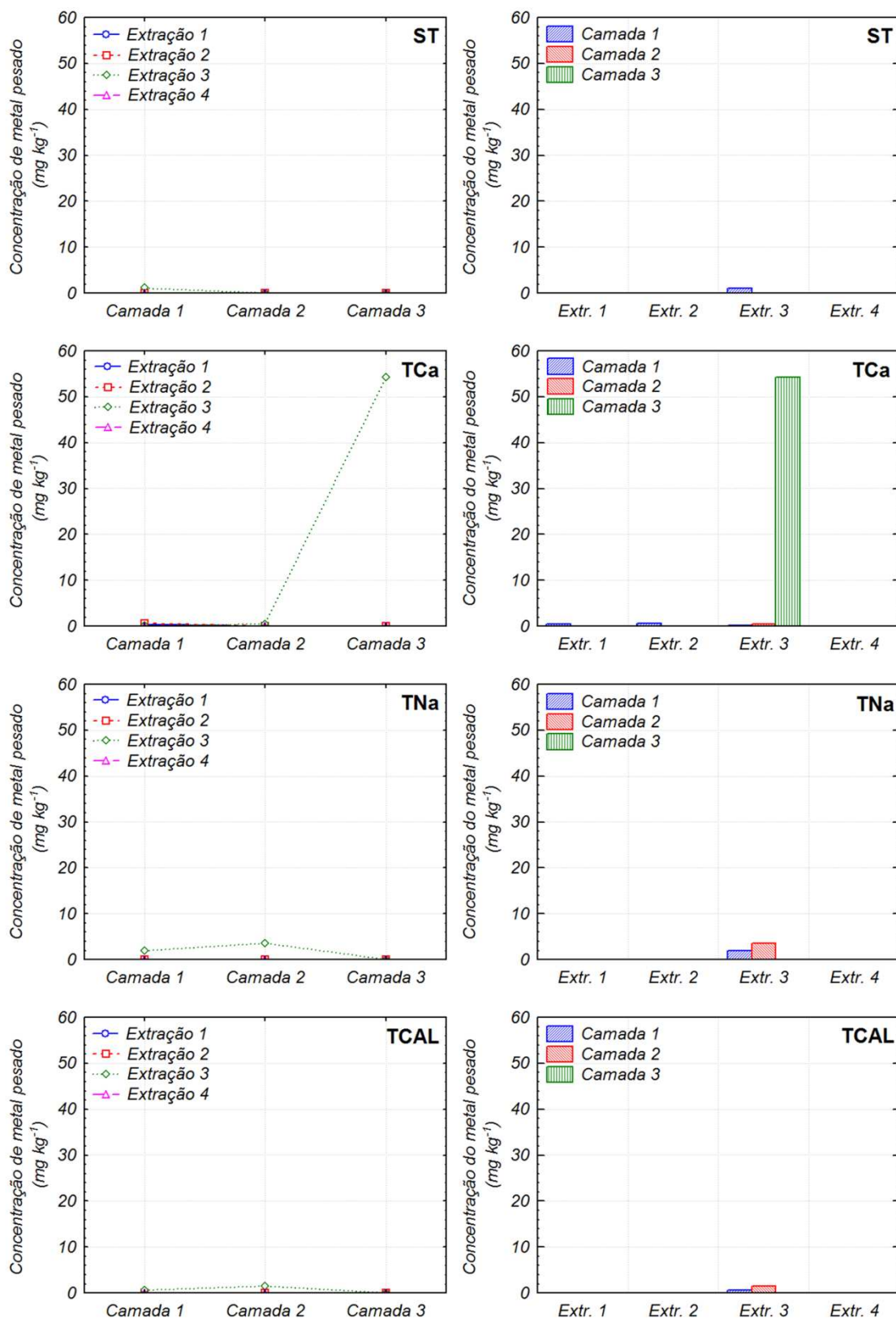


Figura 6-7. Valores de concentração referente às etapas da extração sequencial de amostras dos solos ST, TCa, TCAL e TNa, respectivamente, considerando-se o metal pesado Pb.

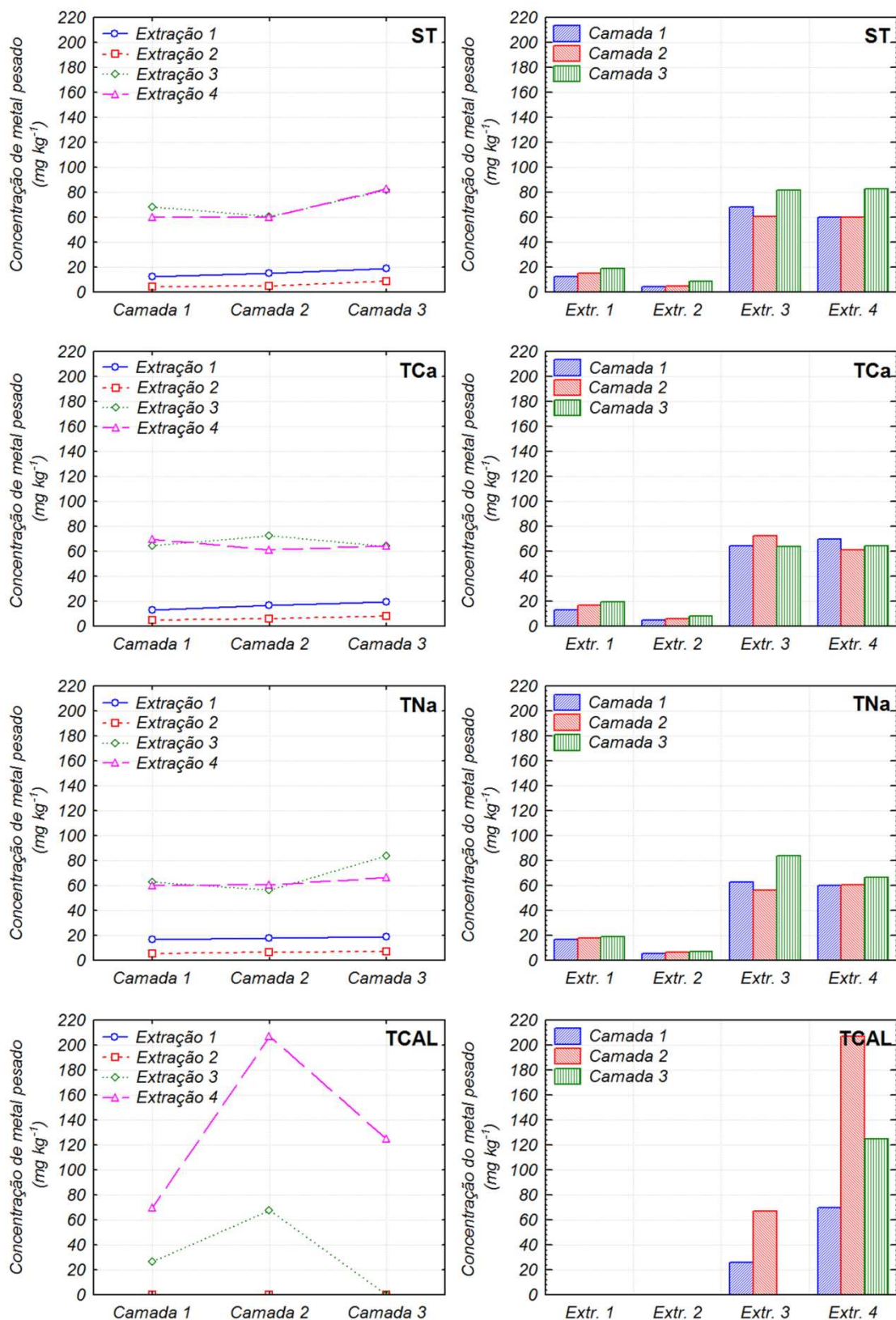


Figura 6-8. Valores de concentração referente às etapas da extração sequencial de amostras dos solos ST, TCa, TCAL e TNa, respectivamente, considerando-se o metal pesado Zn.

Com base nos resultados apresentados na Figura 6-4 e tomando-se o solo ST como ponto de referência, é possível afirmar que apenas os solos TCa e o TCAL apresentaram comportamentos significativamente melhores quanto à adsorção do metal pesado Cd, ficando o solo TNa com resultados considerados não satisfatórios. Observa-se, também, que foi apenas registrada presença de Cd nas três etapas iniciais da extração sequencial, ou seja, não foi detectada concentração de Cd residual, exceto para o solo TCAL. Isso significa que o solo TCAL tem um poder de retenção melhorado quando a referência é o solo ST, bem como que este metal está mais fortemente adsorvido. Ressalta-se que para o solo TNa os quantitativos de metais adsorvidos são valores relativamente baixos quando comparados com o solo ST, o que implica em nenhum ganho de capacidade de retenção dos metais empregados devido ao tratamento com Na.

Com base nos resultados apresentados na Figura 6-4, observam-se, ainda, que somente o solo TCAL revelou grandes concentrações de Cd na última etapa da extração sequencial (Cd residual). Também, se observam valores consideráveis na extração 3 (Cd adsorvido especificamente) para esse solo, sendo que nas extrações iniciais não se registrou a sua presença. Essas observações indicam que a adsorção do Cd pelo solo TCAL é de elevada força, não sendo possível sua remoção por processos como percolação de água. Em outras palavras, não se verificou a existência de Cd solúvel e nem de Cd trocável nas amostras analisadas do solo TCAL. Ressalta-se, ainda, que as maiores concentrações encontradas nesse solo estão localizadas na camada de entrada do fluxo contaminante, ou seja, a camada 3, que apresenta as maiores concentrações, observando-se nas camadas 2 e 1 valores progressivamente menores, indicando que o quantitativo de metal que passou pela amostra é mínimo frente ao que entrou. Nos demais solos, a adsorção ficou restrita a apenas às três etapas iniciais e com valores reduzidos em cada etapa, o que mais uma vez indica que o tratamento não se mostrou eficiente na capacidade de adsorção de Cd.

A Figura 6-5 traz as concentrações de Mn nos quatro solos, individualizada por camada e também por etapa da extração sequencial. Partindo do solo ST como o ponto de referência, é notória uma significativa

---

melhoria no comportamento do solo TCAL em relação aos demais, principalmente quando o comparativo é a forma de adsorção do Mn. Em todos os solos, foi detectado Mn em concentrações semelhantes nas três amostras que representam, respectivamente, as camadas 1, 2 e 3 de cada corpo de prova para cada um dos tratamentos, comparando-se as etapas da extração sequencial.

Ainda com relação aos dados apresentados na Figura 6-5, nota-se que o solo TCAL se destacou no potencial de adsorção do metal Mn fortemente às partículas de solo. Esse fato é constatado por observação do gráfico do solo TCAL, onde apenas foi detectada sua presença nas etapas 3 e 4 da extração sequencial. Observa-se, também, que as maiores concentrações desse metal estão presentes nas camadas de entrada do fluxo, com redução gradativa à medida que se aproxima da última camada superior do corpo de prova. Tal comportamento mostra que a camada de entrada ainda não atingiu seu limite de adsorção deste metal e que aquele cátion que não foi adsorvido ficou retido na camada posterior. Por outro lado, nas duas primeiras etapas da extração sequencial não foi detectada a presença de Mn no solo TCAL. Isso significa que não há Mn solúvel e nem trocável na massa desse solo; assim, é rara a possibilidade de cátions desse metal se desprenderem das partículas de solo e serem lixiviados para um manancial contaminando-o. Ressalta-se, ainda, que a grande capacidade de adsorção de metais pesados pelo solo TCAL pode estar associada ao seu alto valor de pH, fruto da adição de cal hidratada ao solo ST. Essa propriedade é de exclusividade desse solo quando comparado com os demais solos estudados.

A Figura 6-6 traz as concentrações de Ni encontradas nas camadas dos corpos de prova dos quatro solos estudados. Observando-se, primeiramente, os resultados desse metal no solo ST, tem-se que as suas maiores concentrações estão na forma residual, ou seja, aderidas fortemente aos minerais do solo, porém não sendo expressivos os valores encontrados, uma vez que o solo ST é o parâmetro de comparação. Analogamente ao solo ST, os solos TCa e TNa não revelaram valores significantes no quesito adsorção de Ni, ou seja, o tratamento do solo ST com cloreto de cálcio e cloreto de sódio não surtiu efeito para esse metal, ao passo que o solo TCAL apresentou grandes



---

concentrações de Ni na forma residual e, também, na forma de adsorção específica.

Segundo os dados apresentados na Figura 6-6, além de apresentar valores de concentrações superiores aos demais solos, os resultados referentes ao solo TCAL revelam que à medida que se distancia do ponto de entrada do fluxo, a concentração de Ni se reduz ao longo do corpo de prova. Tal observação possibilita afirmar que as camadas iniciais não estão ainda saturadas com Ni e, portanto, possuem, ainda, capacidade de adsorção desses cátions. Porém, mesmo sendo possível adsorver mais cátions, alguns podem fluir por essa camada sem se aderirem às partículas do solo sendo seguros pela próxima, o que justamente vem-se confirmar através dos resultados desse ensaio. Seguramente o tratamento do solo ST com cal hidratada proporcionou grandes benefícios quanto à capacidade de adsorção de Ni em seus minerais, sobretudo devido aos valores de pH mais elevados e à facilidade de troca proporcionada pelo cátion  $\text{Ca}^{2+}$ .

Na Figura 6-7 têm-se os resultados das concentrações do metal Pb nos solos estudados. Observa-se que, praticamente, não foi detectado presença de Pb através do ensaio de extração sequencial nas amostras de solos. Entretanto, apesar dos ensaios de percolação em coluna não mostrarem a presença de Pb no efluente, esperava-se que este fosse observado nos ensaios de extração sequencial realizados. Uma possibilidade é que, devido às concentrações de Pb serem relativamente baixas, os quantitativos de Pb a serem medidos estejam abaixo da faixa mínima de aferição do aparelho. Outra possibilidade é a precipitação desse metal no recipiente onde se armazenou o efluente por algum tempo, que pode ter favorecido o processo de precipitação. Assim, no caso especial do metal Pb, os resultados apresentados na mencionada figura não permitem se chegar com confiança a conclusões. As concentrações oscilaram muito e apenas no solo TCa houve um registro de uma concentração de valor considerável, não sendo possível afirmar que o solo tratado com cloreto de cálcio se mostrou mais eficiente que os demais solos por meio apenas desse valor.

E por último, a Figura 6-8 traz as concentrações do metal Zn nas camadas dos corpos de prova de cada solo em paralelo com os resultados em

---

separado de cada etapa da extração sequencial. Através dos resultados obtidos, observa-se que os tratamentos do solo ST com íons cálcio e íons sódio surtiram efeitos contrários aos almejados. O solo ST apresentou concentrações de Zn em suas camadas ligeiramente superiores aos apresentados pelos solos TCa e TNa, o que caracteriza os tratamentos como não eficientes para uso como barreiras impermeáveis. Entretanto o solo TCAL, novamente revelou bons resultados com concentrações de metal Zn superiores às aquelas apresentadas pelos demais solos. Ressalta-se ainda que os metais adsorvidos por esse solo estão fortemente aderidos aos minerais de solo, ou seja, boa parte dos metais foi adsorvida especificamente e outra parcela considerada residual.

Ainda com base nos resultados apresentados na Figura 6-8, de um modo geral observa-se, ainda, que não ocorreu grandes variações das concentrações de metais adsorvidos entre as camadas de um mesmo corpo de prova, exceto para o solo TCAL que apresentou maiores concentrações na camada intermediária. No entanto, a ocorrência de Zn na primeira camada foi apenas na forma residual, fato que pode estar ligado a uma possível homogeneização não adequada do solo no momento da sua preparação para a compactação do corpo de prova. Essa observação possibilita dizer que o solo TCAL mostrou ganhos no potencial de adsorção do metal pesado Zn, principalmente por suas formas de adsorção serem as mais fortes possíveis, ou seja, adsorvidas especificamente e residual. Devido ao processo de reação da cal hidratada com o solo ocorrer a curto, médio e longo prazo, a adsorção de metais pesados pelo solo TCAL pode ter sofrido algum tipo de influência benéfica do processo de cura, uma vez que o processo de contaminação perdurou por, aproximadamente, doze meses.

Por fim, destaca-se que o solo tratado com cal hidratada (TCAL) apresentou ganhos significativos de adsorção dos quatro metais pesados estudados nesse trabalho em relação ao solo ST, exceto em relação ao metal Pb.

---

## 6.5 CONCLUSÕES

Através do exposto ao longo desse capítulo, pode-se concluir que:

- com relação aos parâmetros ótimos de compactação, apenas o solo TCAL não apresentou variação significativa com relação ao solo ST. Por outro lado, a adição dos sais ao solo ST produziu expansão de sua dupla camada difusa, favorecendo a ocorrência de fenômenos de dispersão e o conseqüente aumento da massa específica aparente seca máxima da ordem de 6,8% e redução do teor de umidade ótimo da ordem de 10,7%;
- exceto o solo TCAL, todos os outros solos estudados apresentaram concentrações semelhantes em cada camada do corpo de prova, caracterizando o fato de que os solos estão contaminado praticamente em todas as suas massas;
- os tratamentos do solo ST com cloreto de cálcio e cloreto de sódio não apresentaram comportamentos significativamente melhores do que o solo ST, sendo que em alguns casos se posicionaram pior em relação ao mesmo;
- as camadas dos corpos de prova referentes à saída do fluxo de percolação apresentaram quantitativos significativamente menores que as demais, o que implica dizer que essas massas de solo ainda não atingiram suas capacidades de retenção; e
- o tratamento do solo ST com cal hidratada mostrou melhoria significativa no seu potencial de retenção dos metais pesados. Os resultados sugerem fortemente que o potencial de adsorção do solo TCAL está diretamente relacionado com o seu pH, que é significativamente mais elevado; nesta situação os metais pesados são adsorvidos especificamente e detectados nas fases 3 e 4 do processo de extração sequencial.

---

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo - ensaio de compactação: método de ensaio**. 10 f. Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1986.

EGREJA FILHO, F. B., **Extração seqüencial de metais pesados em solos altamente intemperizados: utilização de componentes – modelo e planejamento com misturas ternárias na otimização do método**. 2000. 287 f. Tese de Doutorado, Departamento de Solos, UFV. Viçosa, Minas Gerais, 2000.

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.

NASCENTES, R. **Estudo da mobilidade de metais pesados em um solo residual compactado**. 2006. 153 f. Tese. (Doutorado em Engenharia Civil / Geotecnia). Universidade Federal de Viçosa, 2006.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Ground Water Models Scientific and Regulatory Applications**. National Academy Press, Washington, D. C. 1990. 303 p.

TRINDADE, T. P. **Caracterização tecnológica de três solos residuais estabilizados quimicamente com vistas a aplicações em geotecnia rodoviária e ambiental**. 2006. 251 f. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), UFV. Viçosa, Minas Gerais, 2006.

TRINDADE, T. P.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; BARBOSA, P. S. A; SILVA, C. H. C.; MACHADO, C. C. **Compactação dos solos**. Viçosa: Editora UFV, 2008. ISBN: 978-857269-331-8.

VELTEN, R. Z. **Condutividade eletrosmótica e remediação de solos contaminados com cádmio via eletrosmose**. 2008. 145 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), UFV. Viçosa, Minas Gerais, 2008.

---

## **CAPÍTULO 7. CONCLUSÃO GERAL E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

### **7.1 CONCLUSÃO GERAL**

Encerrando-se o presente texto, têm-se como conclusões gerais:

- o equipamento implementado para a realização dos ensaios de percolação em coluna se mostrou eficiente para a realização dos ensaios de condutividade hidráulica e dos ensaios de percolação em coluna;
- a produção dos solos modificados foi realizada com sucesso por meio da adição ao solo ST dos sais cloreto de sódio e cloreto de cálcio, no teor de 1%, e da cal hidratada, no teor de 2%, que produziram graus de saturação dos íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  no seu complexo de troca iguais ou superiores a 95%. Essas alterações levaram a mudanças comportamentais em termos de ductilidade, aumento da massa específica aparente seca máxima e redução no teor ótimo de umidade dos solos TCa e TNa, sendo que praticamente não alterou suas granulometrias, do ponto de vista prático de engenharia. Contudo, para o solo TCAL não se observou a ocorrência de mudanças significativas nos parâmetros de compactação, mas uma tendência para um comportamento frágil, bem como redução da fração fina;
- o gradiente hidráulico não influenciou o comportamento do coeficiente de condutividade hidráulica dos solos durante o ensaio de percolação em coluna. Porém, através de análise estatística para obtenção do fator de retardamento dos solos, conclui-se que o gradiente hidráulico influenciou o processo de retenção de metais pesados, ocorrendo redução do fator de retardamento com o decréscimo do mesmo. O solo TCAL se sobressaiu aos demais no processo de retenção de metais pesados;

- o solo TCAL apresentou melhorias significativas no seu comportamento mecânico em comparação com o solo ST e curvas de ruptura do tipo frágil observadas nos ensaios de cisalhamento direto e compressão não confinada, sendo que os solos TCa e TNa apresentaram valores de resistência na ruptura semelhantes ao do solo ST;
- evidenciou-se que a adição da cal hidratada ao solo ST foi responsável pela produção de uma mistura cimentada e mais rígida que as demais, sobretudo considerando que no ensaio com o cone penetrométrico quase-estático se notou uma influência pouco significativa da base de apoio do corpo de prova na resistência de ponta, indicando comportamento de ruptura do tipo puncionamento;
- por meio dos ensaios de retração, pode-se concluir que os comportamentos de todos os solos analisados foram similares, ressaltando apenas uma pequena melhoria para essa característica para o solo TCAL; e
- o tratamento do solo ST com cal hidratada mostrou melhoria significativa no seu potencial de retenção dos metais pesados. Os resultados sugerem fortemente que o potencial de adsorção do solo TCAL está diretamente relacionado com o seu pH, que é significativamente mais elevado; nesta situação os metais pesados são adsorvidos especificamente e detectados nas fases 3 e 4 do processo de extração sequencial.

---

## 7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aprimorar o equipamento de percolação em coluna de solo, no sentido de sanar algumas imperfeições construtivas que foram observadas no decorrer da execução dos ensaios de percolação em coluna de solo, por exemplo, substituição do coletor de efluente por um mais eficiente, válvula de segurança para impedir o retorno da solução contaminante, caso aconteça falha no compressor de ar ou mesmo ocorra interrupção de energia elétrica.
- Segundo literatura consultada, os coloides húmicos possuem cargas negativas consideráveis, podendo ser um agente de retenção de metais pesados. Nesse sentido, seria interessante a adição de um percentual de material húmico no solo em quantitativo que não interfira no seu comportamento mecânico, visando uma possível ampliação da capacidade de retenção de metais pesados.
- Uma vez que o presente trabalho evidenciou que a adição de cal hidratada ao solo amplifica o seu potencial de adsorção de metais pesados e ainda conduz a uma forma de retenção de difícil liberação para o meio, é de interesse que se realizem estudos com diferentes teores de cal hidratada para averiguar o percentual ótimo técnica e economicamente para essa finalidade.
- Além dos estudos geotécnicos já realizados neste trabalho, é de interesse que sejam realizados ensaios de compressão oedométrica e ensaios triaxiais nos corpos de prova ensaiados via percolação em coluna antes e após a contaminação com metais pesados, para efeito de comparação de resultados.
- Considerando-se o grande potencial da cal hidratada como elemento que favorece o processo de retenção de metais pesados no solo analisado, torna-se necessário realizar uma gama mais detalhada de ensaios químicos e mineralógicos que possam esclarecer os mecanismos de adsorção ocorridos, podendo-se referir a ensaios de raios-X, análises químicas, microscopia eletrônica de varredura, dentre outros.

- 
- Avaliar a influencia do gradiente hidráulico na estrutura dos solos analisados, com determinação de resistência ao cisalhamento, compressibilidade e condutividade hidráulica, para fins de validação de funcionamento de equipamento.