

ANDRÉ LUCIANO DE CARVALHO

**CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS SUBSUPERFICIAIS EM ÁREA DE
DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS – O CASO DO
ANTIGO LIXÃO DE VIÇOSA (MG)**

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

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2001**

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

T
C331c
2001

Carvalho, André Luciano de, 1967-
Contaminação de águas subsuperficiais em área de dis-
posição de resíduos sólidos urbanos – o caso do antigo
lixão de Viçosa (MG) \ André Luciano de Carvalho. –
Viçosa : UFV, 2001.
122p. : il.

Orientador: Roberto Francisco de Azevedo
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de
Viçosa

1. Águas subsuperficiais - Contaminação por líquido
percolado. 2. Resíduos sólidos. 3. Contaminantes - Trans-
porte por metais pesados. I. Universidade Federal de
Viçosa. II. Título.

CDD 19.ed. 628.168

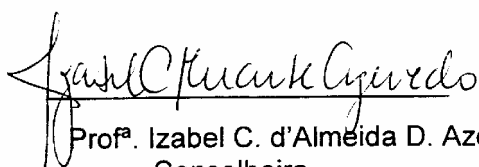
CDD 20.ed. 628.168

ANDRÉ LUCIANO DE CARVALHO

**CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS SUBSUPERFICIAIS EM ÁREA DE
DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS – O CASO DO ANTIGO
LIXÃO DE VIÇOSA (MG)**

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

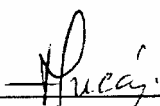
APROVADA: 20 de julho de 2001.



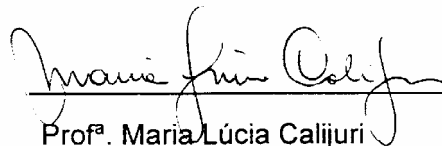
Prof^ª. Izabel C. d'Almeida D. Azevedo
Conselheira



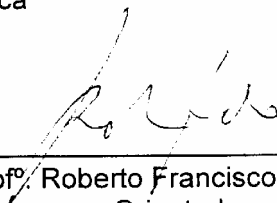
Prof^º. Antônio Teixeira de Matos
Conselheiro



Prof^º. José F. Thomé Jucá



Prof^ª. Maria Lúcia Calijuri



Prof^º. Roberto Francisco de Azevedo
Orientador

Com saudade, mas com certeza de que elas estão num plano melhor, dedico esta tese a minha mãe Judith e a minha irmã Maria, exemplos de vida, dedicação, sabedoria e sacrifício, que sempre me incentivaram mostrando com discernimento e carinho o real sentido da vida e que durante os momentos mais duros desta jornada, me deram forças para eu vencer o cansaço. Agora imagino as palavras que elas me diriam por ter vencido esses obstáculos. E chego até sentir aquele abraço apertado que elas me dariam neste momento tão importante da minha vida. E é agora que sei porque a vida continua. É porque elas continuam vivendo dentro de mim.

A minha sobrinha Imaculada, exemplo de força e de vida.

Aos meus irmãos, cunhados e sobrinhos pelo incentivo, alegria e carinho especial.

A querida Gorete, amiga e companheira de todos os momentos.

E especialmente a todas as pessoas, que se realizam e encontram a paz na verdade; e acreditam que o melhor está por ser conquistado. É só mais um passo. O próximo.

AGRADECIMENTO

A Deus, pela minha vida, pelo sentido existencial que Ele me dá, sempre me fortalecendo diante das dificuldades passageiras da vida.

Aos meus pais, José e Judith, aos meus irmãos Maria e Ailton, que não deixaram de estar ao meu lado em um só instante, mesmo estando perto de Deus.

Aos meus irmãos, Anésio, Tuca, Anésia, Antônio, Areci, Alcina, Alice, Maurília, Cidinho; aos meus cunhados e sobrinhos queridos, pelo companheirismo, amizade, carinho e alegria, que fazem parte da minha vida.

A minha noiva Gorete, pelo carinho e incentivo e aos seus familiares pela grande acolhida.

Mais do que agradecer pelo incentivo, pela confiança, pelos ensinamentos, pela dedicação constante e, sobretudo, o respeito e amizade, gostaria de expressar meu carinho muito especial, aos meus orientadores, professores e amigos Roberto Francisco de Azevedo e Izabel Christina d'Almeida Duarte Azevedo que de forma diferente, proporcionaram contribuições fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Antônio Teixeira de Matos, do Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental, pela grande ajuda, ensinamentos e atenção dispensada.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil pelo auxílio na compreensão dos conteúdos e em especial a Eduardo Antonio Marques, pelo convívio alegre e saudável.

Aos técnicos laboratoristas Julinho, Paulo (Capelão) e Paulo (P3) pela importante ajuda na execução dos ensaios de laboratório e campo.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Civil, em especial Cristina Beatriz, Maria Cristina Alves, Jorge e Geraldo pelo apoio e pela convivência agradável.

A Lucimar, do Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental, pela grande ajuda na execução dos ensaios de coluna de lixiviação.

A “WATERCLEAN Tratamento e Análises de Águas S/C. Ltda.” e em especial ao Anésio e Jesiel pelo apoio técnico e incentivo durante a elaboração desta tese e, sobretudo, na minha vida profissional.

Aos amigos André Luiz e Rejane por todo apoio dispensado para viabilizar a coleta de dados de campo e laboratório, e sobretudo pela grande amizade que se construiu.

Aos colegas da pós-graduação, em especial ao Alex, Rogério, Mário Sérgio, Rodrigo, Orlando e Sérgio pela amizade.

Aos meus amigos Plínio e Danilo, pela convivência agradável do dia-a-dia e pela grande ajuda na elaboração desta tese e ao novo companheiro Eduardo.

Aos meus amigos e companheiros de longa caminhada Amaury, Sandra Regina e Margarete, pela força e carinho dado nesta difícil fase de minha vida.

A Universidade Federal de Viçosa por me proporcionar a oportunidade de participar do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

A CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao CEETPS e à ETE “Júlio de Mesquita” por terem me concedido o afastamento, mesmo sendo sem remuneração, para cursar o mestrado.

Enfim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta tese e a todas as pessoas que irão realizar e encontrar no meu trabalho o conhecimento, justificando-lhe, assim, o seu propósito.

BIOGRAFIA

ANDRÉ LUCIANO DE CARVALHO, filho de José Dutra de Carvalho e Judith Rodrigues de Carvalho, nasceu em 22 de abril de 1967, na cidade de São Geraldo - MG.

Em julho de 1989, graduou-se em Tecnologia da Construção Civil – Modalidade: Edifícios, pela Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, em São Paulo – SP.

Em julho de 1990, graduou-se em Licenciatura Plena, Professor da Parte de Formação Especial do Currículo do Ensino de 2º Grau pela Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, em São Paulo – SP.

Em abril de 1992 iniciou a carreira de professor no curso técnico de Edificações na ETE “Júlio de Mesquita” do Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza” da UNESP, em Santo André – SP.

Em dezembro de 1995, graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade de Guarulhos, em Guarulhos – SP.

Em abril de 1999, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Civil, área de concentração em Geotecnia Ambiental, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa – MG.

ÍNDICE

LISTA DE QUADROS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS	xvi
RESUMO	xx
ABSTRACT	xxii
1. Introdução	1
1.1. Objetivos	3
1.2. Estrutura da dissertação	3
2. Revisão de Literatura	5
2.1. Introdução	5
2.2. Monitoramento de águas subterrâneas e superficiais	8
2.2.1. Caracterização da qualidade da água	10
2.3. Decomposição dos resíduos sólidos	17
2.4. Caracterização do percolado	18
2.4.1. Fatores que influenciam a formação do chorume	19
2.4.2. Fatores que influenciam a composição do chorume	21
2.4.3. Produção de percolado em aterros	22
2.4.4. Alteração das características do percolado no solo	23

2.5.	Trabalhos semelhantes.....	25
3.	Materiais e Métodos.....	31
3.1.	Localização e acesso.....	31
3.2.	Clima.....	32
3.3.	Geomorfologia.....	34
3.4.	Geologia.....	34
3.5.	Solos.....	34
3.6.	Trabalho de campo e laboratório.....	35
	3.6.1. Sondagens de simples reconhecimento.....	39
	3.6.2. Instalação de piezômetros.....	39
	3.6.3. Coleta e análise d'água.....	40
	3.6.4. Determinação das propriedades geotécnicas do solo.....	42
	3.6.5. Ensaio em coluna de lixiviação.....	43
4.	Apresentação dos Resultados dos Ensaios.....	54
4.1.	Sondagens de simples reconhecimento.....	54
4.2.	Propriedades geotécnicas do solo.....	61
4.3.	Caracterização dos resíduos sólidos gerados na cidade de Viçosa (MG).....	63
	4.3.1. Comparação com resíduos de outras cidades.....	64
4.4.	Análise da água na região do antigo “lixão” de Viçosa (MG).....	66
4.5.	Análise do solo na região do antigo “lixão” de Viçosa (MG).....	70
4.6.	Curvas de eluição.....	72
5.	Modelagem Numérica.....	85
5.1.	Obtenção dos resultados da percolação dos contaminantes.....	93
	5.1.1. Evolução da pluma de contaminação em relação ao tempo.....	105

5.1.2. Comparação dos dados de campo com os simulados para 15 anos.....	112
6. Conclusões e Sugestões.....	115
7. Referências Bibliográficas.....	117

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Composição física e química do percolado de aterros sanitários evidenciando as mais altas concentrações verificadas (MANTEL, 1975)

Quadro 2 - Comparação de parâmetros físicos, químicos e bacteriológicos de líquidos percolados de três aterros sanitários de São Paulo (Adaptado de ORTH, 1981)

Quadro 3 - Composições química e bacteriológica do percolado do “lixão” do Jangurussu

Quadro 4 - Média das precipitações mensais do Município de Viçosa (MG)

Quadro 5 - Ensaio de caracterização

Quadro 6 - Resultado das sondagens

Quadro 7 - Resultado da sondagem SPT-09

Quadro 8 - Resultado da sondagem SPT-10

Quadro 9 - Resultado da sondagem SPT-11

Quadro 10 - Resultado da sondagem SPT-12

Quadro 11 - Resultado da sondagem SPT-13

Quadro 12 - Resultado da sondagem SPT-14

Quadro 13 - Resultado dos ensaios de caracterização

Quadro 14 - Resultado dos ensaios de permeabilidade das amostras de solo

Quadro 15 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Viçosa (MG)

Quadro 16 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos de algumas cidades do Estado de Minas Gerais

Quadro 17 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos de algumas cidades brasileiras

Quadro 18a - Nível d'água nos piezômetros

Quadro 18b - Nível d'água nos piezômetros

Quadro 18c - Nível d'água nos poços

Quadro 19 - Resultado da análise da água na região do antigo "lixão" de Viçosa (MG) coletado no dia 24/09/00

Quadro 20 - Resultado da análise da água na região do antigo "lixão" de Viçosa (MG) coletado no dia 10/04/01

Quadro 21 - Resultado da análise das amostras de solo na área do antigo "lixão" de Viçosa (MG)

Quadro 22 - Análises químicas das amostras de solo

Quadro 23 - Parâmetro de transporte dos elementos

Quadro 24 - Parâmetros de transporte de dispersividade longitudinal e difusão efetivo

Quadro 25 - Parâmetros de transporte fornecidos para a análise numérica

Quadro 26 - Limites de Peclet e Courant na análise numérica

Quadro 27 - Concentração (mg/L) de metais pesados de líquidos percolados de vários aterros

Quadro 28 - Concentração (%) aos 15 anos

Quadro 29 – Comparação da concentração (mg/L) aos 15 anos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Destinação final do lixo no Brasil.

Figura 2 - Lixão.

Figura 3 - Aterro Sanitário Sítio São João (SP).

Figura 4 - Lixo.

Figura 5 - Esquema do fluxo de água em um aterro sanitário (CORRÊA SOBRINHO, 2000).

Figura 6 - Vista geral da área subjacente do depósito de lixo.

Figura 7 - Média das precipitações (mm) totais mensais entre 1980 e 1999.

Figura 8 - Levantamento planialtimétrico da área estudada.

Figura 9 - Perfil longitudinal A-A'.

Figura 10 - Instalação de piezômetro.

Figura 11 - Coletor de amostragem de água.

Figura 12 - Esquema do ensaio de coluna de lixiviação.

Figura 13 - Anel de PVC com lã de vidro e tela de nylon.

Figura 14 - Colocação do corpo de prova sobre o anel de PVC.

Figura 15 - Cilindro de PVC.

Figura 16 – Detalhe do preenchimento do espaço entre a coluna de solo e o cilindro de PVC.

Figura 17 – Detalhe da saturação das amostras por capilaridade.

Figura 18 – Vista do sistema de alimentação com água deionizada.

Figura 19 – Detalhe da retirada de água deionizada em excesso no topo das colunas de lixiviação.

Figura 20 – Detalhe do sistema em operação, com os corpos de prova recebendo o “coquetel” de metais pesados, para a ocorrência do escoamento permanente, em condições de saturação.

Figura 21 – Detalhe da forma de coleta dos efluentes das colunas de lixiviação.

Figura 22 – Vista dos frascos utilizados para a coleta do efluente das colunas de lixiviação.

Figura 23a - Curva granulométrica para o solo da profundidade de 3,00 m.

Figura 23b - Curva granulométrica para o solo da profundidade de 7,00 m.

Figura 24 - Comparação entre curvas de eluição do zinco – “Argila 3,00 m” – Amostra 2.

Figura 25 - Comparação entre curvas de eluição do zinco – “Argila 3,00 m” – Amostra 3.

Figura 26 - Comparação entre curvas de eluição do zinco – “Argila 7,00 m” – Amostra 4.

Figura 27 - Comparação entre curvas de eluição do zinco – “Argila 7,00 m” – Amostra 5.

Figura 28 - Comparação entre curvas de eluição do zinco – “Argila 7,00 m” – Amostra 6.

Figura 29 - Comparação entre curvas de eluição do cádmio – “Argila 3,00 m” – Amostra 2.

Figura 30 - Comparação entre curvas de eluição do cádmio – “Argila 3,00 m” – Amostra 3.

Figura 31 - Comparação entre curvas de eluição do cádmio – “Argila 7,00 m” – Amostra 4.

Figura 32 - Comparação entre curvas de eluição do cádmio – “Argila 7,00 m” – Amostra 5.

Figura 33 - Comparação entre curvas de eluição do cádmio – “Argila 7,00 m” – Amostra 6.

Figura 34 - Comparação entre curvas de eluição do cobre – “Argila 3,00 m” – Amostra 2.

Figura 35 - Comparação entre curvas de eluição do cobre – “Argila 3,00 m” – Amostra 3.

Figura 36 - Comparação entre curvas de eluição do cobre – “Argila 7,00 m” – Amostra 4.

Figura 37 - Comparação entre curvas de eluição do cobre – “Argila 7,00 m” – Amostra 5.

Figura 38 - Comparação entre curvas de eluição do cobre – “Argila 7,00 m” – Amostra 6.

Figura 39 - Comparação entre curvas de eluição do chumbo – “Argila 3,00 m” – Amostra 2.

Figura 40 - Comparação entre curvas de eluição do chumbo – “Argila 3,00 m” – Amostra 3.

Figura 41 - Comparação entre curvas de eluição do chumbo – “Argila 7,00 m” – Amostra 4.

Figura 42 - Comparação entre curvas de eluição do chumbo – “Argila 7,00 m” – Amostra 5.

Figura 43 - Comparação entre curvas de eluição do chumbo – “Argila 7,00 m” – Amostra 6.

Figura 44 - Perfil crítico discretizado em elementos finitos.

Figura 45 - Função de condutividade (m/s) versus a pressão (kPa) para a “Argila 3,00 m”.

Figura 46 - Função de condutividade (m/s) versus a pressão (kPa) para a “Argila 7,00 m”.

Figura 47 - Função de condutividade (m/s) versus a pressão (kPa) para a “Areia”.

Figura 48 - Função de teor de água volumétrico versus a pressão (kPa) para a “Argila 3,00 m”.

Figura 49 - Função de teor de água volumétrico versus a pressão (kPa) para a “Argila 7,00 m”.

Figura 50 - Função de teor de água volumétrico versus a pressão (kPa) para a “Areia”.

Figura 51 - Isocurvas de carga total (m).

Figura 52 - Isocurvas de carga de pressão (m).

Figura 53 - Isocurvas de teor de água volumétrico.

Figura 54 - Isocurvas de velocidade XY (m/s).

Figura 55 - Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento zinco na "Argila 3,00 m".

Figura 56 - Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento zinco na "Argila 7,00 m".

Figura 57 - Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento zinco na "Areia".

Figura 58 - Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento cádmio na "Argila 3,00 m".

Figura 59 - Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento cádmio na "Argila 7,00 m".

Figura 60 - Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento cádmio na "Areia".

Figura 61 - Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento cobre na "Argila 3,00 m".

Figura 62 - Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento cobre na "Argila 7,00 m".

Figura 63 - Função de adsorção versus (m^3/g) concentração do elemento cobre na "Areia".

Figura 64 - Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento chumbo na "Argila 3,00 m".

Figura 65 - Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento chumbo na "Argila 7,00 m".

Figura 66 - Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento chumbo na "Areia".

Figura 67 - Isocurvas de concentração de zinco após 15 anos.

Figura 68 - Isocurvas de concentração de zinco após 30 anos.

Figura 69 - Isocurvas de concentração de cádmio após 15 anos.

Figura 70 - Isocurvas de concentração de cádmio após 30 anos.

Figura 71 - Isocurvas de concentração de cobre após 15 anos.

Figura 72 - Isocurvas de concentração de cobre após 30 anos.

Figura 73 - Isocurvas de concentração de chumbo após 15 anos.

Figura 74 - Isocurvas de concentração de chumbo após 30 anos.

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS

C = concentração de metal pesado

C_0 = concentração inicial de metal pesado

Ca = cálcio

CaCO_3 = carbonato de cálcio

Cd = cádmio

CETESB = Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

Cl^- = cloreto

cm = centímetro

CO_2 = gás carbônico

CO_3^{2-} = carbonato

CONAMA = Conselho Nacional do Meio Ambiente

COPAM = Conselho Estadual de Política Ambiental

COT = carbono orgânico total

CH_4 = gás metano

Cr = cromo

CTRW = programa de elementos finitos para cálculo de problemas de transporte de contaminantes

Cu = cobre

D_0 = coeficiente de difusão em solução livre

D_e = coeficiente de difusão efetivo ou difusão molecular

DBO = demanda bioquímica de oxigênio

D_h = coeficiente de dispersão-difusão

disp = disponível

D_m = dispersão mecânica

DQO = demanda química de oxigênio

e_{nat} = índice de vazios natural

Fe = ferro

Fe^{+2} = cátion ferro II

Fe^{+3} = cátion ferro III

FS = furo de sondagem

g = grama

g/kg = grama por quilo

g/L = grama por litro

GEO-SLOPE = conjunto de programas para análise de problemas geotécnicos

H_2 = gás hidrogênio

H^+ = íons hidrogênio

Hg = mercúrio

HNO_3 = ácido nítrico

IBGE= Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IP = índice de plasticidade (%)

K = potássio

L = litro

lab = laboratório

Lat. S = latitude sul

LL = limite de liquidez (%)

Long. W Gr. = longitude a oeste de Greenwich

LP = limite de plasticidade (%)

m = metro

Mg = magnésio

mg/kg = miligrama por quilo

mg/L = miligrama por litro

mL = mililitro

mm = milímetro

Mn = manganês

N_2 = gás nitrogênio

N = nitrogênio

Na = sódio
Ni = níquel
NMP/100 mL = número mais provável por 100 mL
 NO_3^- = nitrato
N-SPT = número de golpes – *standard penetration test*
OD = oxigênio dissolvido
 OH^- = hidróxido
OMS = Organização Mundial de Saúde
P = fósforo
Pb = chumbo
Pedr = pedregulho
Pd = predominante
PET = polietileno tereftalato
pH = potencial hidrogeniônico
 PO_4^{3-} = fosfato
PVC = cloreto de polivinila
 R_d = fator de retardamento
S = grau de saturação (%)
SEEP/W = programa de elementos finitos para cálculo de problemas de percolação
SF = sólidos fixos
Si = silício
 SO_3 = sulfeto
 SO_4^{2-} = sulfato
 SO_2 = sulfito
SV = sólidos voláteis
SW = sudoeste
troc = trocável
V = velocidade de percolação
 V_i = volume inicial
 V_f = volume final
VP = volume de poros
 V_v = volume de vazios
Zn = zinco

γ_{nat} = peso específico natural (kN/m^3)

γ_s = peso específico das partículas sólidas (kN/m^3)

W = teor de umidade (%)

α = dispersividade longitudinal do meio poroso na direção de transporte

α_T = dispersividade transversal

\varnothing = diâmetro

$^{\circ}\text{C}$ = graus Celsius

" = polegada

RESUMO

CARVALHO, André Luciano de M.S., Universidade Federal de Viçosa, Julho de 2001. **Contaminação de águas subsuperficiais em área de disposição de resíduos sólidos urbanos – o caso do antigo lixão de Viçosa (MG).** Orientador: Roberto Francisco de Azevedo. Conselheiros: Izabel Christina Duarte d’Almeida Azevedo e Antônio Teixeira de Matos.

Uma das formas mais antigas de disposição dos resíduos sólidos urbanos (lixo) consiste em jogá-los diretamente sobre o solo, na superfície ou em depressões, no que habitualmente em nosso país se denomina “lixão”.

A decomposição do lixo gera, entretanto, um líquido de coloração escura, formado a partir de enzimas excretadas por bactérias decompositoras e água, denominado “chorume”, que é altamente poluidor (ORTH, 1981). Sob a ação da chuva, o chorume mistura-se com a água que infiltra no lixo formando o percolado. A infiltração deste líquido nos solos é uma das maiores preocupações ambientais relacionadas com os lixões, uma vez que o percolado normalmente transporta uma série de compostos químicos e biológicos capazes de poluir os mananciais de águas superficiais ou subterrâneas.

No município de Viçosa (MG), a disposição de lixo foi feita sem qualquer controle da contaminação do solo e lençol freático, colocando em risco a qualidade ambiental.

Nesta tese foi realizada uma avaliação do transporte de contaminantes numa área em que o lixo do município de Viçosa foi depositado durante cerca de 10 anos. A área, que teve seu uso encerrado há aproximadamente 5 anos pelas autoridades municipais, situa-se na Fazenda Pedreira, zona rural do município, conhecida com Barrinha, próxima à rodovia que liga as cidades de Viçosa e Porto Firme.

Para a caracterização da área, foi feito, inicialmente, um levantamento planialtimétrico, em seguida realizou-se uma campanha de sondagem à percussão, composta de 26 furos, com o objetivo de determinar a estratigrafia e o padrão de fluxo na área, bem como a espessura da camada do lixo. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas dos solos para a determinação das propriedades geotécnicas e a realização de ensaios de coluna de lixiviação. Com os resultados obtidos nos ensaios de coluna de lixiviação, foram traçadas as curvas de eluição dos metais pesados nos solos “Argila 3,00 m” e “Argila 7,00 m”, com as quais pode-se determinar os parâmetros de transporte R_d e D_h . Com estes parâmetros, realizou-se um estudo numérico para avaliar a movimentação com o tempo da pluma de contaminante de cada metal pesado no solo. Amostras de água em superfície e subsuperfície foram coletadas com o propósito de determinar a concentração de metais pesados (zinco, cádmio, cobre e chumbo) presentes. Por fim, foram feitas comparações entre as concentrações destes metais pesados obtidas com uso das análises numérica e as encontradas no campo.

ABSTRACT

CARVALHO, André Luciano de, M.S., Federal University of Viçosa, July 2001.
Contamination of the underground water in an area of domestic solids waste disposition – the case of the old dump of Viçosa (MG). Adviser: Roberto Francisco de Azevedo. Committee Members: Izabel Christina Duarte d’Almeida Azevedo and Antônio Teixeira de Matos.

One of the oldest domestic solids waste disposal method consists of dumping the residues directly on the soil, on its surface or depressions, on sites normally called dumps.

The waste decomposition originates a dark liquid formed by water and enzymes expelled by bacteria decomposition, called “chorume”, that is extremely pollutant (ORTH, 1981). With rain, the “chorume” mixes with the rainwater that infiltrates in the waste forming the leachate. The percolation of this liquid in the soil is one of the biggest environmental concerns related to dumps, since the leachate usually transports a series of chemical and biological compounds that may pollute sources of superficial and/or underground waters.

In the Municipal District of Viçosa (MG), the waste disposal has been done without any contamination control of the soil and the water table, threatening the environment.

In this thesis, an evaluation of the transport of pollutants was accomplished in an area used to dump the waste of Viçosa city during about 10 years. The area, which was closed by the city authorities approximately 5 years

ago, is located at “Fazenda Pedreira”, rural zone of Viçosa city, also known as “Barrinha”, close to the road between Viçosa and Porto Firme cities.

Initially, a topographic map of the area was obtained. Following, an in-situ testing program was performed consisting of 26 borings holes (SPT test), aiming to determine the stratigraphy and the flow pattern in the area, as well as the thickness of the residues. Disturbed and undisturbed soil samples were collected for the determination of the geotechnical properties to make samples for the of column tests. Water samples were collected in surface and sub-surface in order to determine the concentration of heavy metals (zinc, cadmium, copper and lead) in the field. With the results obtained from column tests, breakthrough curves of the heavy metals in the soils "Clay 3,00m" and "Clay 7,00m" were traced and transport parameters R_d and D_h were obtained. With these parameters, a numerical study was performed to evaluate the movement with time of the contamination plume of each heavy metal. Finally, comparisons were made between concentrations of heavy metals obtained numerically and in-situ.

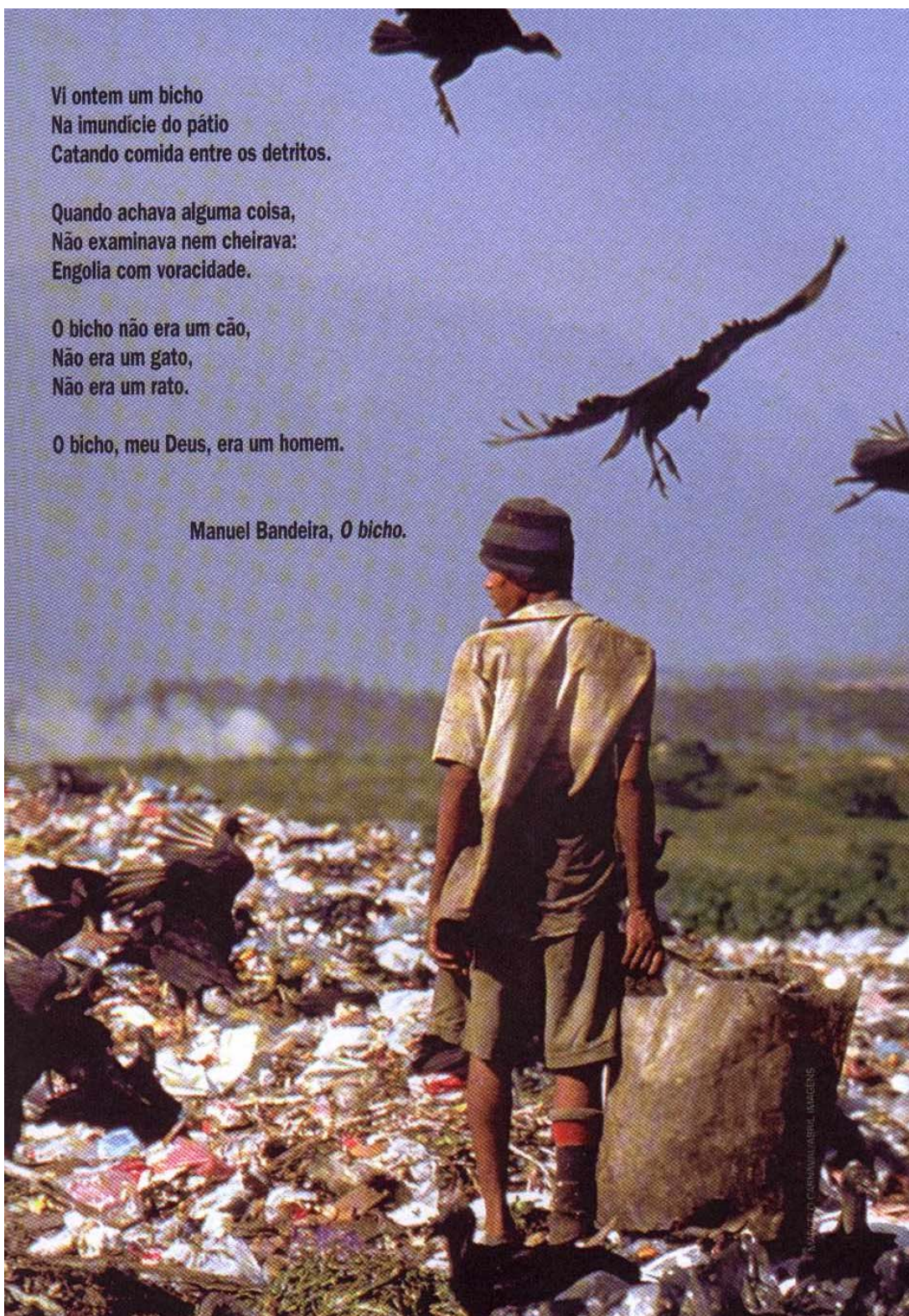
Vi ontem um bicho
Na imundície do pátio
Catando comida entre os detritos.

Quando achava alguma coisa,
Não examinava nem cheirava:
Engolia com voracidade.

O bicho não era um cão,
Não era um gato,
Não era um rato.

O bicho, meu Deus, era um homem.

Manuel Bandeira, *O bicho*.



1. INTRODUÇÃO

A água é estratégica para a subsistência de todos os seres da Terra. Apesar de abundante, já que ocupa três-quartos da superfície do planeta, cerca de 97% é salgada. Dos restantes 3%, 2,2% encontram-se nas calotas polares e em geleiras, não sendo, portanto, disponíveis para a utilização. O que sobra, cerca 0,8%, encontra-se no subsolo (aproximadamente 97%), constituindo os aquíferos subterrâneos, e apenas uma pequena parcela (aproximadamente 3%) localiza-se em superfície, formando os lagos e rios.

O estudo dos meios e processos de contaminação destes recursos hídricos é muito importante e deve ser efetuado em todos os níveis e escalas, a fim de protegê-los da poluição (GADOTTI, 1997).

O crescimento populacional e industrial fez com que uma grande quantidade de resíduos tais como, lixo doméstico, lixo hospitalar, lixo industrial, etc., fosse produzida e descartada de alguma forma na biosfera, comprometendo, assim, a qualidade ambiental (PAIVA, 1998). Este problema é ainda mais grave nos chamados países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, onde há pouco ou nenhum saneamento básico, o que contribui para a contaminação e poluição dos recursos hídricos, tornando-os impróprios para usos mais nobres.

Uma das formas mais antigas de disposição dos resíduos sólidos urbanos (lixo) consiste em jogá-los diretamente sobre o solo, na superfície ou em depressões, no que habitualmente em nosso país se denomina “lixão”.

Com a decomposição do lixo, gera-se um líquido de coloração escura, formado a partir de enzimas excretadas por bactérias decompositoras e água, denominado “chorume”, que é altamente poluidor (ORTH, 1981). Sob a ação da chuva, o chorume mistura-se com a água que infiltra no lixo formando o percolato. A movimentação deste líquido nos solos é uma das maiores preocupações ambientais relacionadas com os lixões, uma vez que o percolato normalmente transporta uma série de compostos químicos e biológicos capazes de poluir os mananciais de águas superficiais ou subterrâneas.

O Brasil produz cerca de 100.000 toneladas/dia de resíduos sólidos de origem domiciliar e grande parte deles são depositados desordenadamente em lixões. Assim, milhares de municípios brasileiros não possuem tratamento adequado para os resíduos, provocando uma série de impactos sanitários, sociais, ambientais e econômicos.

Os dados dos IBGE apresentados por PRANDINI e outros (1995), mostram que a disposição final do lixo no Brasil é feita em lixões (76%), aterros controlados (13%), aterros sanitários (10%) e usinas de compostagem / incinerador (1%), (Figura 1).

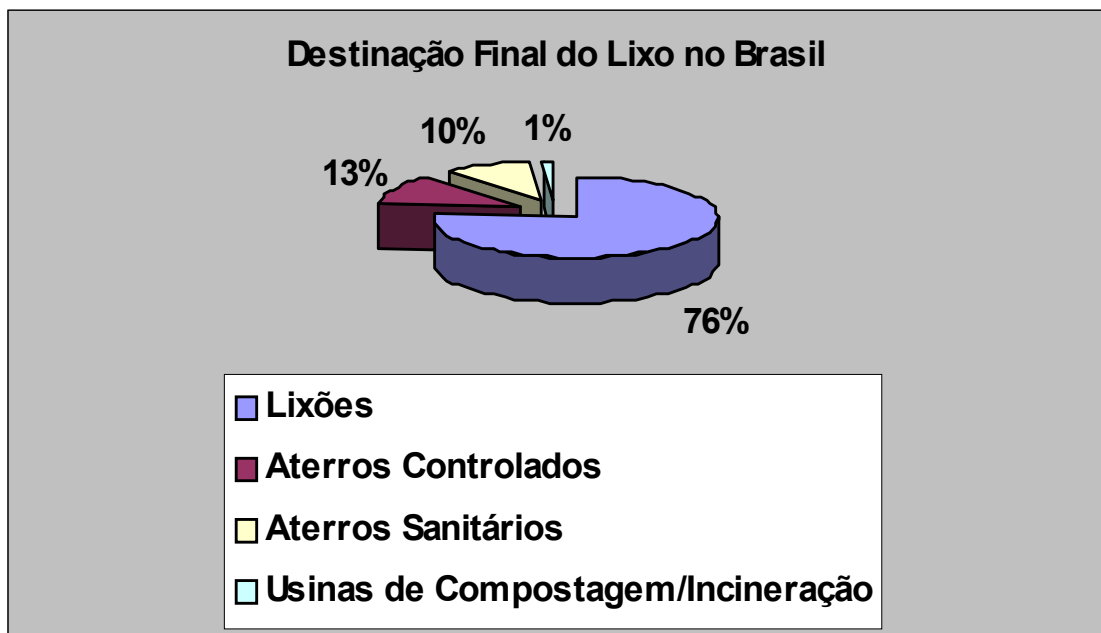


Figura 1 – Destinação final do lixo no Brasil.

1.1. Objetivos

No Município de Viçosa (MG), até os dias de hoje, a disposição de lixo tem sido realizada sem qualquer controle ou monitoramento da contaminação do solo e mananciais superficiais e subterrâneos. Sendo assim, esta pesquisa teve por objetivo geral avaliar o transporte de contaminantes na área em que foi depositado o lixo do município durante cerca de 10 anos, para que isso fosse conseguido, os seguintes objetivos específicos foram perseguidos:

- Determinar os parâmetros de transporte de 4 metais pesados (zinco, cádmio, cobre e chumbo) nos solos do local;
- Analisar numericamente as características do fluxo subterrâneo na região, bem como a movimentação de plumas de contaminantes;
- Comparar as concentrações dos quatro metais pesados estudados obtidas numericamente e no laboratório com amostras obtidas no campo.

1.2. Estrutura da dissertação

A presente dissertação de mestrado foi estruturada em 7 capítulos. No primeiro capítulo, apresentou-se o tema, bem como o objetivo proposto para a pesquisa.

No segundo capítulo contém uma revisão de literatura na qual apresenta-se, inicialmente, algumas definições a respeito de aterros de resíduos sólidos. Posteriormente, abordou-se os temas: monitoramento de águas subterrâneas e superficiais, decomposição de resíduos sólidos, caracterização de percolados e trabalhos anteriores semelhantes ao desenvolvido nesta tese.

No terceiro capítulo, são descritas as metodologias utilizadas durante todas as etapas desta pesquisa, bem como o levantamento de dados para a execução dos trabalhos de campo e laboratório, apresentando uma caracterização geral da área incluindo: localização e acessos, clima, geomorfologia, constituintes do solo e geologia da região de Viçosa.

No quarto capítulo, foram apresentados e discutidos os resultados dos trabalhos de campo e laboratório e os resultados da caracterização física, química e bacteriológica da água coletada.

No quinto capítulo, está apresentada a análise numérica feita com os programas SEEP/W e CTRAN/W.

No sexto capítulo, estão apresentadas as conclusões referentes ao conteúdo abordado nos capítulos anteriores. Também estão expostas algumas sugestões para pesquisas futuras que poderão contribuir para o aumento do conhecimento científico sobre o assunto.

No sétimo capítulo, estão apresentadas as referências bibliográficas citadas nesta tese.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Introdução

Inicialmente serão apresentadas as definições de alguns termos a serem usados, de forma contínua, em todo o corpo desta tese, com o intuito de facilitar a compreensão do que foi feito e das discussões dos resultados obtidos.

◆ Lixão

Lixão é uma forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos, que se caracteriza pela simples descarga sobre o solo, sem medidas de proteção ao ambiente ou à saúde pública, podendo ser entendido como o mesmo que descarga de resíduos a céu aberto (Figura 2).

◆ Chorume

Sumeiro, ou chorume, ou purina, é um líquido produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, que tem como características a cor escura, o mau cheiro e a elevada DBO (demanda bioquímica de oxigênio).



Figura 2 – Lixão.

◆ **Percolado**

Percolado é todo líquido que passa através de um meio poroso. No caso de aterros de lixo, as águas de infiltração, ao percolarem no meio, carregam consigo os produtos da decomposição orgânica ou disponíveis, podendo vir a contaminar as águas subterrâneas de menor profundidade, que são explotadas com uso de poços rasos por populações pobres que vivem na periferia dos grandes centros urbanos.

◆ **Aterro sanitário**

Aterro Sanitário é uma obra de engenharia que tem como objetivo acomodar no solo, no menor espaço possível, resíduos domiciliares e urbanos sem causar danos ao meio ambiente ou à saúde pública (Figura 3).

Apesar de ser o método mais simples de destinação final de resíduos sólidos, o aterro sanitário exige cuidados especiais e técnicas específicas a serem seguidas, desde a seleção e preparo da área até a sua operação e monitoramento.



Figura 3 – Aterro Sanitário Sítio São João (SP).

◆ Aterro controlado

É uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos, cobrindo-os com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho, diminuindo dessa forma os impactos ambientais.

Esta forma de disposição produz, em geral, poluição localizada, pois similarmente ao aterro sanitário, a extensão da área de disposição é minimizada. Porém, geralmente não dispõe de impermeabilização de base (comprometendo a qualidade das águas subterrâneas), nem sistemas de coleta e tratamento de chorume ou de dispersão dos gases gerados.

◆ Lixo

Sabendo que o lixo é formado por resíduos sólidos (sobras) das atividades do homem: papéis, plásticos, metais, vidros, couro, borracha, tecidos, madeira, terra, cerâmica, restos de alimentos, etc., PEREIRA NETO (1999) propõe a seguinte definição: “Lixo é uma massa heterogênea de resíduos sólidos, resultantes das atividades humanas, que podem ser

parcialmente reciclados e reutilizados, com isso gerando, entre outros benefícios, proteção à saúde pública e economia de energia e de recursos naturais”.

Embora lixo e resíduos sólidos sejam a mesma coisa, o termo lixo é preferencialmente adotado (Figura 4).



Figura 4 - Lixo.

2.2. Monitoramento de águas subterrâneas e superficiais

O monitoramento da água subterrânea tem a finalidade de detectar alterações na qualidade da água devido a infiltração de percolato e gases no subsolo.

As águas subterrâneas apresentam características qualitativas relacionadas com as estruturas geológicas por onde circulam, e também são suscetíveis de contaminação por fontes externas de poluição. A localização de uma estação de amostragem (poço ou piezômetro) é definida em função do programa de monitoramento que pode apresentar os seguintes objetivos básicos: avaliação de tendências, monitoramento de uma fonte de contaminação e monitoramento para pesquisa.

A avaliação de tendências visa a identificar alterações de comportamento no tempo ou no espaço. O monitoramento de uma fonte de poluição em um aquífero pode pretender avaliar a concentração de um determinado poluente ou da carga poluidora capaz de afetar o lençol subterrâneo. Com o objetivo de pesquisa, a operação pode ser orientada para verificar o comportamento de vários tipos de contaminantes, ou avaliar repercussões a curto, médio e longo prazos.

O método de monitoramento constitui basicamente na perfuração de poços que interceptam o aquífero, permitindo a retirada de amostras para a realização de análises em laboratório. Para tanto, deve-se instalar poços a montante e a jusante em relação possível ao poço de contaminação, seguindo-se a direção de fluxo do aquífero.

A obtenção de amostras representativas de águas subterrâneas constitui uma tarefa de grande complexidade, pois cada situação necessita de uma abordagem específica. Quando um poço ou piezômetro se encontra em repouso, parte da coluna líquida contém água estagnada (na região fora do filtro) e parte contém água que se renova por meio do fluxo subterrâneo (região junto aos filtros). Às vezes, ocorre o fenômeno de convecção térmica, que acarreta um certo grau de mistura dessas águas. Quando um poço é colocado em operação, a primeira água que é extraída não representa a água do aquífero; portanto, antes da tomada da amostra, deve-se esgotar o poço, de duas a três vezes o seu volume. Quando o poço apresenta trechos com alta permeabilidade, a água deve ser extraída preferencialmente desses locais; caso haja um rebaixamento excessivo que coloque essas áreas fora de produção, as águas amostradas serão provenientes de outros locais, podendo apresentar características bastante distintas da anteriormente coletada. Para contornar essa situação, recomenda-se construir piezômetros de multiníveis em que as amostras podem ser tomadas de diferentes profundidades, sendo os locais de amostragem isolados entre si por um tampão de material impermeável (argila ou bentonita).

Em poços equipados com bombas manuais ou mecânicas deve-se bombear a água durante aproximadamente cinco minutos e realizar a desinfecção da saída da bomba, antes da coleta das amostras. Em poços sem bomba, a amostragem deverá ser feita diretamente no poço, utilizando-se um

recipiente esterelizado, tomando-se o cuidado para não retirar amostras de camadas mais superficiais da coluna de água evitando-se, com isso, a contaminação com a espuma, ou com o material das paredes do poço.

Quando as amostras forem coletadas diretamente de um corpo de água, deve-se procurar selecionar pontos de amostragem bem representativos do todo, evitando-se a coleta de amostras em áreas estagnadas ou em locais muito próximos às margens.

2.2.1. Caracterização da qualidade da água

A qualidade da água pode ser representada por meio de diversos parâmetros que traduzem as suas principais características físicas, químicas e biológicas. Esses parâmetros podem ser de utilização geral, tanto para caracterizar águas de abastecimento, águas residuárias, mananciais e corpos receptores. Segue abaixo a descrição de alguns dos principais parâmetros para interpretação dos resultados de análise de água.

→ Alcalinidade

Segundo CARVALHO (2000), alcalinidade da água pode ser definida como a sua capacidade de neutralização de um ácido. Portanto, alcalinidade não significa necessariamente que o pH do meio deva ser superior a 7. Podem ocorrer casos em que as águas subterrâneas com pH abaixo de 7 podem conter alguns sais que neutralizam ácidos e, nesse caso, haver alguma alcalinidade mensurável.

A alcalinidade da água não representa problema para a água potável, mas quando em elevadas concentrações pode conferir um gosto amargo à água.

→ Dureza

A dureza da água é comumente avaliada pela quantidade de sabão necessária para que produza espuma na mesma. Poderia ser definida como

sendo propriedade de dissipar sabão, visto que em uma água dura a espuma não se produzirá enquanto os sais minerais causadores da dureza não houverem sido removidos pela sua combinação com o sabão. A matéria removida torna-se evidente pela espuma insolúvel que se forma durante os processo de lavagem CARVALHO (2000).

Não há evidências de que a dureza cause problemas de potabilidade à água, e alguns estudos realizados em regiões onde há ocorrência de águas com maior dureza indicaram uma menor incidência de doenças cardíacas na população. Entretanto, em determinadas concentrações, pode causar sabor desagradável e ter efeitos laxativos para seres humanos.

Com uma dureza abaixo de 50 mg/L a água é considerada mole. Uma dureza de 50 a 150 mg/L não é objetável para a maioria dos usos da água, não obstante a quantidade do sabão gasto, que cresce com a dureza.

→ pH

Representa a concentração de íons hidrogênio H^+ (em escala anti-logarítmica), dando uma indicação sobre a condição de acidez, neutralidade ou alcalinidade da água. A faixa de pH é de 0 a 14.

Um pH igual a 7,0 indica uma solução neutra, nem ácida, nem alcalina. Se for menor que 7,0, indica uma condição ácida; maior que 7,0 corresponde a uma solução alcalina.

→ Fosfato

O fósforo é considerado um dos elementos essenciais para o crescimento de protistas, plantas e de algas e, quando em elevadas concentrações em lagos e represas, pode conduzir a um crescimento exagerado desses organismos (eutrofização). Sua presença como nutriente é muito importante para o crescimento e reprodução dos microrganismos que promovem a degradação da matéria orgânica. O fósforo se encontra nesses efluentes sob a forma de compostos orgânicos, principalmente proteínas e fazendo parte dos compostos minerais principalmente nos polifosfatos e ortofosfatos GADOTTI (1997).

→ Nitrogênio

Segundo GADOTTI (1997), o nitrogênio pode estar presente nos resíduos orgânicos sob forma orgânica, amoniacal, nítrica ou nitrosa. A determinação do nitrogênio total é feita quando se quantifica os teores de N nas quatro formas:

$$N_{\text{total}} = N_{\text{orgânico}} + N_{\text{amoniacal}} + N_{\text{nitritos}} + N_{\text{nitratos}}$$

Nitrificação é o processo de oxidação da amônia a nitrato, realizadas por bactérias aeróbias quimiossintetizantes que por meio de sua síntese celular liberam energia.

A amônia ou nitrogênio amoniacal pode ser um constituinte natural de águas superficiais ou subterrâneas, proveniente da decomposição da matéria orgânica.

A presença de nitratos indica que a matéria orgânica foi totalmente oxidada. A ocorrência natural de nitratos nos mananciais subterrâneos é geralmente baixa e encontra-se relacionada à ocorrência de chuva ou à decomposição aeróbia de material orgânico na água. Os teores naturais encontrados nas águas subterrâneas do Estado de São Paulo não ultrapassam 2,5 mg/L. A partir desse teor, pode-se supor início de contaminação. A presença de nitritos indica uma possível contaminação nas proximidades do ponto de coleta.

→ Sólidos totais dissolvidos (S.T.D.)

A concentração total dos minerais dissolvidos na água serve como índice geral da prestabilidade da água para muitos usos. As expressões sólidos dissolvidos totais e sólidos dissolvidos são sinônimos.

A concentração de sais nas águas subterrâneas varia em função de fatores tais como a concentração inicial nas águas que percolam do solo, que por sua vez varia com a qualidade da água da chuva, temperatura, evaporação, etc., e pelas propriedades químicas e físicas do solo.

As águas solubilizam íons e dissolvem sais na parte não saturada e saturada do subsolo, durante seu percurso, sendo esta disponibilidade de sais

e íons dependente dos tipos de rochas do aquífero, e do tempo de escoamento (CETESB, 1998).

A água com demasiado teor de minerais dissolvidos não é conveniente para certos usos. Contendo menos de 500 mg/L de sólidos dissolvidos é, em geral, satisfatória para usos domésticos e para muitos fins industriais.

→ **Oxigênio dissolvido (OD)**

De acordo com Von SPERLING (1996), o oxigênio dissolvido é de essencial importância para os organismos aeróbios (que vivem na presença de oxigênio). Durante a estabilização da matéria orgânica, as bactérias fazem uso do oxigênio nos seus processos respiratórios, podendo vir a causar uma redução da sua concentração do meio. Dependendo da magnitude deste fenômeno, podem vir a causar prejuízos ambientais. Caso o oxigênio seja totalmente consumido, tem-se as condições anaeróbias (ausência de oxigênio), com geração de maus odores. O oxigênio dissolvido é um dos principais parâmetros de caracterização dos efeitos da poluição das águas por despejos orgânicos.

A solubilidade do OD varia com altitude e temperatura. Ao nível do mar, na temperatura de 20⁰C, a concentração de saturação é igual a 9,2 mg/L.

→ **Demanda química de oxigênio (DQO)**

Segundo GADOTTI (1997), a DQO indica a quantidade de oxigênio que é consumida quimicamente por diversos compostos orgânicos, sem a intervenção de microrganismos, fornecendo, em termos de oxigênio consumido, a quantidade de matéria oxidável presente na água.

Existem muitos despejos de origem orgânica que sem serem biologicamente tratáveis, quando lançados em cursos d'água causam demanda de oxigênio, como por exemplo os pesticidas, detergentes, entre outros. Há necessidade, pois, de outro teste que além de quantificar a carga orgânica facilmente biodegradável, eventualmente existente, quantifique, também, a matéria orgânica não biodegradável e, por vezes, causadora de outros tipos de poluição.

→ **Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)**

A DBO, determinada após o decurso de 5 dias de manutenção da amostra de água sob temperatura de 20 °C, reflete a quantidade de oxigênio necessária para degradar a matéria biodegradável presente, transformando-a em formas químicas simples e inertes. Esse trabalho é realizado por microrganismos aeróbios (consumidores de oxigênio dissolvido).

Esse ensaio reflete de forma muito satisfatória a intensidade de despejos de cargas poluidoras relacionadas a efluentes urbanos e, em menor parte rurais. A presença de um elevado teor de matéria orgânica pode levar ao consumo de todo o OD da água, provocando mortandade de peixes e outros organismos. A água com DBO elevada pode apresentar odor e sabor desagradáveis (CETESB, 1998).

→ **Cloretos**

Cloreto é um dos ânions mais comuns em águas naturais, nos esgotos e despejos industriais. O registro contínuo do teor de cloretos das amostras de água dos poços fornece informação da ocorrência ou não da contaminação do aquífero.

A água que contém menos de 150 mg/L de cloretos é satisfatória para muitos fins. Uma concentração de mais de 250 mg/L torna-se, em geral, objetável para o serviço de abastecimento público. Contendo mais de 350 mg/L é contra-indicada para a maior parte das irrigações e usos industriais. Com 500 mg/L, o sabor da água torna-se desagradável (CETESB, 1998).

→ **Sulfatos**

Os sulfatos da água subterrânea são derivados, principalmente da solubilização da gipsita ou anidrita (sulfatos de cálcio). O sulfato de magnésio (sal de Epsom) e o sulfato de sódio (sal de Glauber), se presentes em quantidade suficiente, conferem sabor amargo à água que pode atuar como laxativo em pessoas não habituadas a ingeri-la (CARVALHO, 2000).

Os padrões internacionais para água de consumo humano da O.M.S. adotam, como teores máximo e desejável permissível, respectivamente, 400 mg/L e 200 mg/L.

→ **Metais pesados**

De acordo com GADOTTI (1997), a importância dos metais pesados está relacionada com a função potencialmente inibidora que podem transmitir para o processo de digestão anaeróbia. Outro aspecto relevante é que seu monitoramento, juntamente com outros parâmetros, contribui decisivamente para se verificar a influência que os líquidos percolados de um aterro sanitário podem estar exercendo sobre a qualidade das águas subterrâneas e do solo.

Apresenta-se a seguir algumas considerações sobre a solubilidade de alguns metais mais comuns (COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPEENS, citado por GADOTTI, 1997):

- **Ferro:** a forma reduzida Fe^{+2} é solúvel e móvel; a forma oxidada Fe^{+3} forma precipitados relativamente insolúveis com carbonatos e sulfatos.

- **Zinco:** forma precipitados solúveis com os íons CO_3^{2-} , SO_3 , Si e PO_4^{3-} . O Zn é fortemente adsorvido nas trocas que acontecem no solo, sendo citado como nutriente essencial para as plantas e funções fisiológicas dos seres humanos. Entretanto, quando presente em altas concentrações no organismo, pode causar sérios problemas no esôfago e estômago, além de eventuais problemas nos pulmões e ser corrosivo à pele.

- **Cobre:** forma complexos com a matéria orgânica, que podem ser móveis e pouco solúveis. A formação de hidróxidos de Fe e Mn pode também controlar a imobilização do Cu.

O cobre é um nutriente indispensável às plantas e aos seres humanos quando em baixas concentrações, mas adquire propriedades tóxicas quando em concentrações elevadas. A ingestão de doses excessivamente altas pode acarretar irritação e corrosão da mucosa, danos capilares, problemas hepáticos

e renais e irritação do sistema nervoso central, seguida de depressão. A intoxicação por cobre é muito rara apesar do metal ser bioacumulativo (acumula-se nos seres vivos, inclusive no homem), podendo acarretar problemas em invertebrados e algumas espécies de peixe.

- **Níquel:** é fortemente adsorvido por óxidos de Fe e Mn presentes no solo. É considerado de baixa toxicidade, embora sua ingestão possa causar asfixia e sua inalação provocar câncer. Tem sido considerado como muito tóxico para plantas e vida aquática.

- **Crômio:** na forma hexavalente, são elementos tóxicos, podendo causar lesões na pele e câncer no pulmão.

- **Cádmio:** é elemento de elevado potencial tóxico, sendo irritante gastrointestinal e, na forma de sais solúveis, pode causar intoxicação aguda e crônica em seres humanos.

- **Chumbo:** apresenta alta toxidez, tem efeito cumulativo e pode levar à intoxicação crônica, que pode ser fatal.

→ **Coliformes**

As águas subterrâneas naturais são, geralmente, isentas de bactérias patogênicas e vírus. Contudo, microrganismos não patogênicos podem habitar o meio aquoso subterrâneo. As bactérias movem-se apenas por pequenas distâncias em solos de textura fina, por outro lado, podem se deslocar por longas distâncias em solos de textura grosseira ou rochas fraturadas, sendo esses materiais os mais vulneráveis à poluição por bactérias oriundas das águas de superfície, poluídas por fezes de animais, esgoto, chorume ou outras fontes de poluição (OLIVEIRA, 1997).

Os coliformes totais são bactérias presentes no intestino do homem e de animais de sangue quente, entretanto, podem também estar associadas à

vegetação e ao solo. Algumas espécies podem se multiplicar no solo ou na água.

Os coliformes fecais, constituindo subgrupo das bactérias coliformes, são comumente utilizados como indicador de contaminação fecal, dada a sua ocorrência restrita em fezes humanas e de outros animais de sangue quente. A detecção dessas bactérias indica o risco da presença de organismos patogênicos.

2.3. Decomposição dos resíduos sólidos

Os resíduos sólidos depositados em um “lixão” estão sujeitos à decomposição por atividades físicas, químicas e biológicas, o que resulta em geração de subprodutos sólidos, líquidos e gasosos. A taxa de decomposição é função dos materiais constituintes do lixo, de suas características químicas, físicas e biológicas, da quantidade de oxigênio disponível, da umidade, da temperatura e dos microrganismos presentes (MOTA, 1974).

No início da decomposição é verificada intensa atividade aeróbia, com consequente redução de oxigênio no meio e produção de gás carbônico. Com a diminuição da concentração de oxigênio no meio, tem-se o desenvolvimento de condições propícias à anaerobiose, originando assim uma segunda fase. Nesta segunda fase ocorre intensa atividade digestiva de liquefação, com a formação de ácidos orgânicos que podem ser utilizados como alimento pelas bactérias metanogênicas (MOTA, 1974).

A fase de degradação aeróbia é caracterizada pela atividade de microrganismos aeróbios, ocasião em que as temperaturas verificadas são elevadas, havendo liberação de CO₂ e vapor d'água da massa do lixo. Nesta fase a matéria orgânica é rapidamente decomposta.

Na fase anaeróbia, ocorrem baixas temperaturas de fermentação, em virtude da ausência do oxigênio e em função dos gases desprendidos, tais como metano, sulfídrico, etc.

2.4. Caracterização do percolado

Como as características do percolado são dependentes do material e da taxa de sua decomposição, as bactérias podem ser consideradas como os principais agentes de influência no processo de formação, bem como na formação dos gases associados (CH_4 , CO_2 , H_2 , N_2 , amônia e outros).

O estudo da composição química deste líquido é importante em razão do mesmo ser uma das principais fontes de contaminação em zonas de influência de aterros de resíduos sólidos.

Segundo GOMES (1989), entre 1964 e 1968, vários pesquisadores estudaram a constituição do percolado de aterros (Quadro 1). Avaliando-se os valores apresentados, percebe-se que as inúmeras características negativas dos percolados de aterros sanitários não deixam dúvidas de que seu tratamento é algo necessário, para que a disposição de resíduos sólidos se faça de modo a não comprometer a qualidade ambiental.

SCHRAB et al. (1993), após vários bioensaios de intensidade e toxicidade genética e estimativa de avaliação de risco de câncer nos Estados Unidos, alertaram que o percolado de aterro de resíduos sólidos municipais é tão cronicamente e intensamente tóxico quanto o percolado de aterros de co-disposição de resíduos perigosos.

Quadro 1 – Composição física e química do percolado de aterros sanitários evidenciando as mais altas concentrações verificadas

COMPONENTE	BAIXA (mg/L)	ALTA (mg/L)
pH	6	6,50
Dureza (em CaCO_3)	890	7600
Alcalinidade (em CaCO_3)	730	9500
Ca	240	2330
Mg	64	410
Na	85	1700
K	28	1700
Fe (total)	6,5	220
Fe (ferroso)	8,7	8,7
Cl^-	96	2350
SO_4^{2-}	84	730
PO_4^{3-}	0,3	29
N (orgânico)	2,4	465
N (amoniacal)	0,22	480
DBO	21700	30300

Fonte: MANTEL (1975)

ORTH (1981) apresentou uma comparação dos parâmetros físicos, químicos e bacteriológicos do líquido percolado de alguns aterros de São Paulo, sendo três deles apresentados no Quadro 2. Os parâmetros biológicos, coliformes totais e fecais, apresentaram grandes variações para os aterros estudados.

Quadro 2 – Comparação de parâmetros físicos, químicos e bacteriológicos de líquidos percolados de três aterros sanitários de São Paulo

Parâmetro	Aterro Sanitário								
	Vila Albertina			Pedreira Cit			Raposos Tavares		
	Mín.	Médio	Máx.	Mín.	Médio	Máx.	Mín.	Médio	Máx.
pH	5,9	6,6	7,3	7,2	7,2	7,3	8,4	8,7	7,2
Amônia	308	549	760	818	881	950	2280	2564	2900
Nitrato	0	0,003	0,01	-	-	-	-	-	-
Nitrito	0,16	0,65	1,65	-	5,53	-	1,74	2,24	2,74
DBO	690	10919	198000	3260	3675	4020	700	1389	2270
DQO	4380	18110	28000	6500	7165	8100	6080	6671	7640
Cloreto	854	2341	11000	1450	1530	1650	60	138	180
C. Totais	230	1,7E8	1,7E8	1,4E5	1,6E6	2,4E7	4,9E3	2,3E5	7,9E6
C. Fecais	49	1,7E5	4,9E7	1,4E4	1,2E6	2,4E7	140	3,3E6	1,4E5

Valores expressos em mg/L, exceto pH (adimensional) e Coliformes Totais e Fecais (Número Mais Provável por 100 mL)

Fonte: adaptado de ORTH (1981)

2.4.1. Fatores que influenciam a formação do chorume

A seguir são enumerados os principais fatores que afetam a formação do chorume, que podem ser de natureza quantitativa ou qualitativa, em se tratando do volume ou composição, respectivamente:

(i) Oxigênio: o oxigênio está presente no aterro em razão da troca de gases do ar intersticial e a atmosfera. Contudo, as bactérias aeróbias, presentes na camada superficial do aterro, o consomem rapidamente, limitando a zona aeróbia e prevenindo a formação de metano nessa camada. Segundo OLIVEIRA (1997), as bactérias metanogênicas não são totalmente eliminadas com a introdução de oxigênio, podendo ocorrer um microambiente anaeróbio dentro do ambiente aeróbio.

(ii) pH: as metanobactérias são muito sensíveis às variações de pH, atuando numa estreita faixa entre 6 e 8. Se, de algum modo, estas bactérias se estressam, como quando há diminuição ou aumento do pH, a conversão de ácido acético e hidrogênio diminui, havendo inibição na produção de metano. A presença de materiais tamponantes no aterro, como solo e restos de materiais de construção, entre outros, é importante para a manutenção de uma faixa adequada de pH (CHRISTENSEN & KJELDSEN, 1989).

(iii) Temperatura: é um fator importante nos processos anaeróbios. Uma elevação de temperatura irá aumentar a produção de gás no aterro, ocorrendo, também, a aceleração da decomposição dos resíduos. As bactérias metanogênicas são chamadas mesofílicas, quando a temperatura do meio varia entre 29 e 40 °C e termofílicas, quando a temperatura varia entre 45 e 70 °C. Segundo GOMES (1989), a produção de metano na faixa termofílica é duas vezes maior que na mesofílica.

(iv) Nutrientes: praticamente todos os macro e micronutrientes (nitrogênio, fósforo, enxofre, cálcio, magnésio, potássio, ferro, zinco, cobre, cobalto, molibdênio, selênio, etc) necessários para os processos anaeróbios estão presentes no material orgânico do aterro. A relação ótima de matéria orgânica (expressa em demanda química de oxigênio), nitrogênio e fósforo é de 100:0,44:0,08 (OLIVEIRA, 1997).

(v) Umidade: o excesso de umidade é um fator inibidor por lixiviar substâncias fermentáveis, necessárias à ação das bactérias. A presença de determinados compostos (SO_4^{2-} , CO_2 , íons de sais inorgânicos e metais pesados) em concentrações elevadas inibem o crescimento bacteriano. Torna-se importante ressaltar que quanto mais água infiltrar no aterro maior será o volume de percolados e, conseqüentemente, menor a concentração de elementos químicos.

2.4.2. Fatores que influenciam a composição do chorume

A caracterização da composição do chorume no aterro constitui uma ferramenta essencial para o gerenciamento dos seus impactos, por ser uma das principais fontes de poluição de águas na zona de influência (ROBINSON & GRONOW, 1992). A análise dos principais parâmetros químicos (demanda química de oxigênio, demanda bioquímica de oxigênio, nitrogênio e fósforo) do chorume, fornece não só informações sobre o desenvolvimento dos processos biológicos dentro do aterro, como indica os principais poluentes que podem ser removidos no seu tratamento. Ela também pode sugerir qual tratamento, seja biológico, físico-químico ou a combinação destes processos, será provavelmente o mais eficiente (CHU et al., 1994).

Segundo OLIVEIRA (1997), entre os vários fatores que afetam a qualidade do percolado estão a composição dos resíduos sólidos, a idade do aterro, a sazonalidade, o clima, a precipitação, a hidrologia local e a altura do monte formado pelos resíduos sólidos depositados no aterro sanitário.

A idade dos resíduos sólidos e o grau de estabilização têm efeito importante na composição desse líquido, de forma que o seu potencial poluidor apresenta-se inversamente proporcional à idade do aterro.

CHIAN & DEWALLE (1976), analisando o líquido percolado de um aterro, verificaram mudanças nos valores de DQO, turbidez, cor, pH e sólidos suspensos, em função do tempo. Eles observaram que a idade do aterro pode estar relacionada com a razão entre alguns parâmetros químicos e físicos, como DQO/COT, DBO/COT, SV/SF, SO_4^{2-}/Cl^- , etc.

CHIAN & DEWALLE (1976), verificaram que a razão DQO/COT tende a diminuir com o aumento da idade do aterro. A razão DBO/DQO apresentou resultado semelhante à DQO/COT. De forma contrária, observou-se que a razão sólidos voláteis e sólidos fixos (SV/SF) foi diretamente proporcional à idade do aterro.

Alguns pesquisadores (BOYLE & HAM, 1974; HO et al., 1974; CHIAN & DEWALLE, 1976), observaram mudanças na coloração do percolado com o tempo, variando de amarelo-claro a marrom escuro. CHIAN & DEWALLE (1976), atribuíram a cor aparente marrom à formação de colóides de hidróxido

de ferro. Como consequência, há um aumento da turbidez em função do tempo.

Objetivando avaliar as características do líquido percolado ao longo do tempo e sua correlação com a precipitação pluviométrica, LEITE et al. (1982) monitoraram duas células no aterro sanitário de Jacarepaguá (RJ). Eles verificaram que os valores de DBO aumentavam no início mas logo depois tendiam a diminuir com o tempo e os de pH apresentavam comportamento inverso, baixos no início e, após nove meses, passando à faixa alcalina.

Da mesma maneira, SCHALCH & MORAES (1988), estudando a decomposição dos resíduos sólidos em um ensaio de laboratório, observaram que as características do percolado variaram com o tempo. As variáveis químicas analisadas – nitrogênio total, fósforo, DQO, DBO e matéria orgânica – diminuíram continuamente. Já os valores de pH tiveram aumento gradativo até a faixa alcalina de 6,43 a 9,29.

2.4.3. Produção de percolado em aterros

Diversos fatores contribuem para a quantidade e a qualidade do percolado. A pluviometria é um fator fundamental na quantidade de percolado a ser produzido no aterro.

A previsão da quantidade de percolado produzida é um parâmetro crítico no projeto de um aterro sanitário. De maneira geral, a quantificação do percolado que alcança a base dos resíduos (L_v) é fundamentada no balanço hídrico (KOERNER & DANIEL, 1998), calculado a partir da seguinte equação:

$$L_v = P - R - AS - ET \quad (2.1)$$

Onde:

L_v = volume que passa pela base do aterro;

P = precipitação;

R = volume perdido pelo escoamento superficial;

AS = volume de água absorvido pelos resíduos;

ET = volume perdido por evapotranspiração.

Na Figura 5 está representado o fluxo de água em um aterro sanitário.

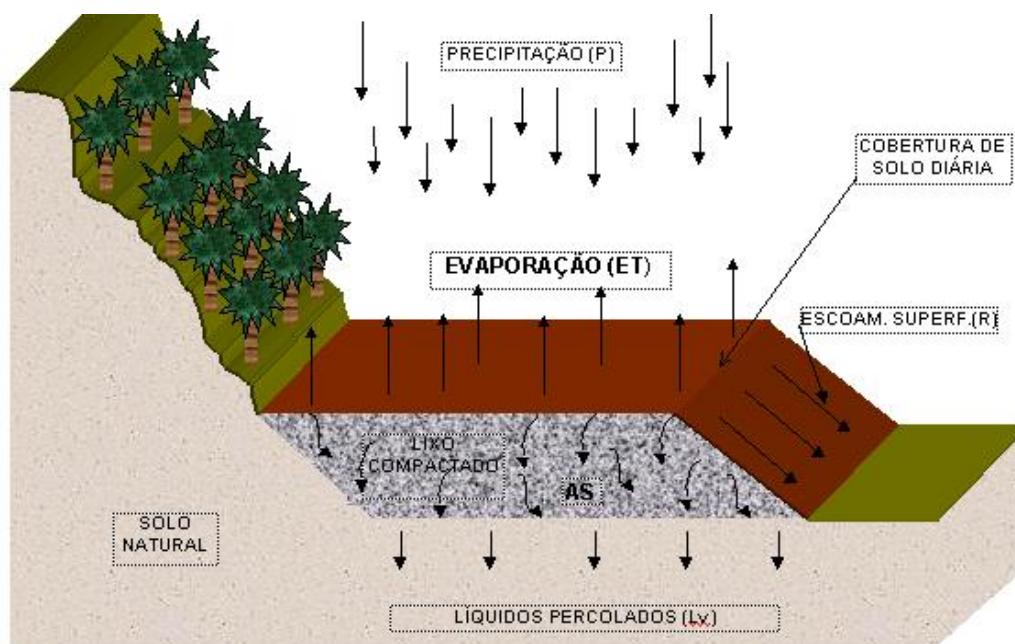


Figura 5 – Esquema do fluxo de água em um aterro sanitário (CORRÊA SOBRINHO, 2000).

2.4.4. Alteração das características do percolado no solo

Os compostos químicos presentes no percolado podem sofrer uma série de reações de conversão e destruição quando percolam através do solo. A capacidade de cada tipo de solo em atenuar esse líquido é diferente. Por exemplo, solos argilosos apresentam maior capacidade de remover metais, já os solos arenosos apresentam melhor resultado na remoção da matéria orgânica. Alguns testes demonstraram que o solo apresenta capacidade limitada de remover certas substâncias químicas do percolado. A partir do momento que esta capacidade é excedida, estes compostos químicos já não são mais afetados pelo solo (O'LEARY & WALSH, 1997).

Segundo O'LEARY & WALSH (1997), os principais mecanismos de alteração das características do percolado são:

- **Filtração mecânica:** diminui a concentração de sólidos suspensos no percolado. A capacidade do solo em filtrar ou remover partículas suspensas depende da textura e da espessura da sua camada. A filtração é efetiva na limitação do deslocamento dos microrganismos, sendo a remoção de patógenos completa se a camada do solo for suficientemente espessa.

- **Precipitação e co-precipitação:** quando o percolado movimenta-se no aterra, mudanças nas condições microambientais, como temperatura, pH e composição da solução podem resultar na imobilização de alguns de seus constituintes, os quais são convertidos em compostos insolúveis. As vantagens da precipitação como mecanismo de remoção de poluentes está em sua alta capacidade e baixa reversibilidade. Estes mecanismos são especialmente importantes na remoção de metais pesados.

- **Adsorção:** os processos de adsorção resultam na redução dos poluentes, que se ligam quimicamente a minerais argilosos, óxidos hidratados e matéria orgânica do solo. A capacidade de adsorção não específica dependerá da disponibilidade de cargas superficiais na matriz do solo, sendo esta característica denominada capacidade de troca de cátions e capacidade de troca aniônica.

- **Diluição e dispersão:** diluição e dispersão pode reduzir a concentração de poluentes no percolado pela sua mistura com maiores quantidades de águas subterrâneas. Porém, a atenuação atingida por este mecanismo não diminui a quantidade total de poluentes no sistema de águas subterrâneas. Se algum tempo depois for detectado que um poluente é prejudicial para a qualidade da água subterrânea, a sua dispersão sobre uma grande área pode tornar impraticável a recuperação desta água por ação remediadora.

- **Atividade microbiana:** a ação microbiana de alteração do percolado é feita pela assimilação e utilização de poluentes orgânicos e inorgânicos pelos

microrganismos do solo. A atividade microbiana pode alterar o pH do líquido e resultar na destruição de microrganismos patogênicos.

- **Volatilização:** ocorre quando o composto migratório evapora e se movimenta para zonas não saturadas do solo acima do lençol freático. Somente substâncias com baixa pressão de vapor podem ser volatilizadas. Essa substância pode, eventualmente, migrar para a superfície do solo e mover-se para a atmosfera. De outra maneira, ela pode tornar-se parte da pluma de gases, movendo-se para fora do aterro por meio de formações subsuperficiais acima do lençol freático.

Deve ser ressaltado que apenas um mecanismo atenuante não será eficaz na remoção ou redução do poluente químico presente no líquido percolado. Todos os mecanismos estarão operando, em algum momento, em qualquer local do aterro no qual esse líquido se movimentando para a base. Os mecanismos mais ativos e o grau de atenuação atingido dependerão das propriedades físicas e químicas do solo.

2.5. Trabalhos Semelhantes

NOBRE (1987) desenvolveu um permeâmetro para ensaios de coluna e obteve parâmetros da equação unidimensional de transporte de massa em meios porosos (coeficiente de dispersão-difusão e dispersividade) de um licor residual da fabricação de zinco quando percolados com dois solos argilosos (Jazida Rodoférrica e Jazida Ingá).

MATOS (1995) com o intuito de determinar os fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão dos metais zinco, cádmio, cobre e chumbo, nos três horizontes dos solos Podzólico Vermelho-Amarelo (PV), Podzólico Vermelho-Amarelo câmbico (PVC) e Latossolo Vermelho-Amarelo álico (LVA), com e sem calagem, do município de Viçosa (MG), conduziu ensaios de coluna de lixiviação, utilizando-se, como solução contaminante, um “coquetel” composto pelos metais pesados, aplicado sob escoamento em meio saturado e sob regime permanente. Os fatores de retardamento apresentaram a seguinte

sequência: Zn<Cd<Cu<Pb, o que determina uma sequência inversa de mobilidade desses metais pesados nos solos estudados.

OLIVEIRA (1997) estudou a caracterização do percolado formado na base do lixão do Jangurussu que flui para o rio adjacente, rio Cocó. O “lixão” está localizado no perímetro urbano da cidade de Fortaleza – CE, na margem esquerda do rio Cocó, sobre sedimentos argilo-arenosos da Formação Barreiras.

O ponto de coleta do percolado localizou-se numa lagoa formada na base do “lixão” do Jangurussu, que tem por objetivo de contê-lo. No Quadro 3 estão apresentadas as composições química, física e bacteriológica do percolado do “lixão” do Jangurussu.

Quadro 3 - Composições química, física e bacteriológica do percolado do “lixão” do Jangurussu

PARÂMETROS	Média	Mínimo	Máximo
pH	8,50	8,30	8,80
DBO	409	200	850
DQO	6027	657	12267
Alcalinidade Total	3325	670	5050
Cloreto	4204	370	9768
Dureza	441	138	600
Sólidos Totais	15555	10000	28400
Amônia	526	2,9	1132
Nitrato	160,50	10	1445
Nitrito	6,08	0,43	42,61
Fósforo Total	7,42	0,37	44,53
Ortofosfato	0,44	0	2,62
Níquel	1,48	-	-
Ferro	46,14	-	-
Zinco	13,68	-	-
Cromo	0,84	-	-
Chumbo	ND	-	-
Coliformes Totais	5E6	4,3E4	1,2E8
Coliformes Fecais	5,8E4	1,3E4	2,4E6

Valores expressos em mg/L, exceto pH (adimensional) e Coliformes Totais e Fecais (Número Mais Provável por 100 mL)
 ND: não detectado

O pH do percolado não apresentou mudanças significativas durante o período de estudo, mantendo-se, praticamente, estável, variando entre 8,3 a 8,8.

Para avaliação da matéria orgânica do percolado, foram utilizados os parâmetros de DBO e DQO. Os valores de DBO variaram de 200 até 850 mg/L, apresentando uma média de 409 mg/L. Para DQO, a média apresentada foi de 6027 mg/L, com valores variando de 657 até 12267 mg/L. Estes valores indicaram que a matéria orgânica presente neste percolado está tendendo à estabilização.

A razão DBO/DQO encontrada para o percolado do Jangurussu foi de 0,067, estando dentro da média indicada por EHRIG (citado por O'LEARY & WALSH, 1997) para percolado na fase metanogênica, que é de 0,06.

O percolado em estudo apresentou altas concentrações de cloreto, alcalinidade e dureza.

Quanto aos compostos nitrogenados, observou-se que o nitrogênio amoniacal esteve presente em altas concentrações no percolado em estudo, provavelmente devido à degradação biológica de aminoácidos e outros materiais orgânicos nitrogenados, durante a fase acetogênica.

O percolado estudado apresentou baixa concentração de fósforo, sendo que a principal forma foi o fósforo total. A razão DBO/P encontrada foi de 55,13.

Com exceção do chumbo, que não foi possível detectar, os metais analisados no percolado (Ni, Fe, Zn e Cr), apresentaram elevadas concentrações, o que pode ser reflexo da própria composição dos resíduos depositados no "lixão". Os metais ferrosos corresponderam a 3% da composição dos resíduos sólidos urbanos de Fortaleza.

Com exceção do níquel, todos os traços inorgânicos analisados encontraram-se fora dos padrões estabelecidos pela resolução CONAMA nº 20/86, em seu artigo 21, para efluentes a serem lançados, direta ou indiretamente, nos corpos d'água.

Os resultados bacteriológicos do percolado variaram de $4,3 \times 10^4$ a $1,23 \times 10^8$ e de $1,3 \times 10^4$ a $2,4 \times 10^6$ NMP/100 mL, para coliformes totais e fecais, respectivamente. Esta contaminação deve ter origem, principalmente, nos papéis higiênicos usados, fraldas descartáveis, dejetos e animais mortos presentes no "lixão".

Pode-se concluir que a composição do percolado analisado encontra-se estabilizada, prevalecendo condições metanogênicas, constituindo fonte

potencialmente poluidora, visto ter apresentado altas cargas orgânicas, elevadas concentrações de sais e metais. Além disto, as concentrações elevadas de coliformes totais e fecais constituem alto risco de contaminação microbiológica. Outro fator preocupante é que os elevados valores de concentração de amônia, associados ao valor de pH alto, podem ser tóxicos, quando lançados no ambiente.

GADOTTI (1997), estudando o “lixão” da cidade de São Carlos, instalado em uma voçoroca, em terras do Sítio Santa Madalena, onde, por aproximadamente 17 anos, foram depositados resíduos residencial, comercial, industrial e de serviço de saúde, sem a execução de medidas preventivas. O “lixão” está localizado em área de recarga do aquífero Botucatu, principal aquífero do Estado de São Paulo, e às margens do Córrego São José que faz parte da bacia do Ribeirão Feijão, principal fonte de abastecimento da cidade de São Carlos. Neste trabalho avaliou-se a contaminação das águas superficiais e subterrâneas adjacentes ao “lixão”. Foram realizados levantamentos planialtimétrico e geofísico, determinação das direções principais do fluxo e foi instalada uma rede com 15 poços de amostragem e monitoramento para avaliar a interferência dos líquidos percolados provenientes do “lixão” na água subterrânea. Os resultados das análises físicas e químicas indicaram poluição das águas superficiais e subterrâneas adjacentes ao “lixão” e na água subterrânea observou-se uma pluma de contaminantes caminhando no sentido do fluxo que é SW. Convém salientar que, nos poços situados sobre o corpo do “lixo”, foram coletadas amostras a aproximadamente 4 metros da base do “lixo”, uma vez que o lixo foi isolado por um anel de cimento e bentonita.

Dentre todos os parâmetros observados na água subterrânea apenas as concentrações de bário, nitrato e cloreto ultrapassaram o limite de potabilidade, não levando em consideração os parâmetros que deixam em dúvida quanto à contribuição do próprio solo. Os elementos: cromo, cobre, níquel, zinco, fósforo, boro, cádmio e chumbo não foram detectados.

Nas águas superficiais observou-se alterações na sua qualidade demonstrando que o “lixão” é a principal fonte de poluição do Córrego São José, a jusante do “lixão”. Estas alterações foram constatadas, anteriormente,

por RIOS (1993), TEIXEIRA (1993) e MENEZES (1994). Segundo RIOS (1993) e TEIXEIRA (1993) a poluição diminui ao longo do córrego possivelmente pela diluição e pela sua capacidade de autodepuração.

SOUZA (1998) avaliou o nível de contaminação por metais pesados na área do Aterro Sanitário da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte-MG. A área estudada situa-se às margens da BR-040, km 2, na divisa do município de Belo Horizonte com o município de Contagem. Foram coletadas amostras de solos em áreas sem lixo sobreposto e em áreas cobertas por lixo urbano com diferentes idades, além de amostras de água superficial, do nível freático e de chorume, analisadas por meios físicos e químicos. Para o estudo das águas, foram coletadas e analisadas 09 amostras, incluindo as de chorume. As análises físicas e químicas dos solos permitiram o entendimento da mobilidade dos metais pesados e sua dispersão nos perfis. A mineralogia básica desses solos é composta por minerais de rocha ácida (gnaisse) e rochas básicas (gabro e microgabro), com predominância de caulinita na fração argila. Estes estudos mostraram que as camadas superficiais dos solos retêm parte dos metais pesados lixiviados das pilhas de resíduos sólidos, cujas concentrações são relativamente baixas nos solos contaminados. Além disso, as águas superficiais e freáticas do aterro encontram-se contaminadas por compostos orgânicos e inorgânicos.

GERMANO (2001) avaliou o transporte de contaminantes e o nível de contaminação por metais pesados na área do “lixão” atual do município de Viçosa (MG), usando modelos com solução por análise numérica, utilizando o método dos elementos finitos. Com os resultados obtidos em sondagens à percussão realizadas na área em estudo, foi estimado o perfil geotécnico composto por uma espessa camada de solo residual de gnaisse, subdividida em residual maduro (horizontes A e B), mais superficial, e residual jovem (horizonte C), assentes sobre rocha alterada, impenetrável. Em seguida, obteve as curvas de eluição de metais pesados (cádmio, cobre e chumbo) destes dois solos a partir de ensaios de coluna de lixiviação. Com isso, foram calculados os parâmetros R_d e D_n . Com estes parâmetros, conseguiu-se estimar, até 100 anos, a movimentação das plumas de contaminação de cada

metal pesado. De uma maneira geral, concluiu-se que a contaminação do lençol freático por metais pesados na região do lixão da cidade de Viçosa (MG), em função da disposição dos resíduos estar sendo feita há somente cerca de 4 anos, é insignificante, uma vez que os contaminantes analisados só penetraram por um ou dois metros na camada superficial do solo durante este período.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Localização e acesso

A área de estudo desta tese compreende um antigo depósito de lixo, situado no Município de Viçosa, localizado na Zona da Mata de Minas Gerais, conhecido como Fazenda da Pedreira, Barrinha, zona rural, situada a, aproximadamente, 10 quilômetros do centro urbano, próximo à rodovia que liga o Município de Viçosa ao de Porto Firme (Figura 6). O Município de Viçosa, localizado na Zona da Mata de Minas Gerais, tem como coordenadas geográficas o paralelo 20° 45' 14" Lat. S e o meridiano 42° 52' 54" Long. W Gr. e uma altitude média de 649 m. O depósito de lixo possui uma área de aproximadamente 12 hectares e pertence à bacia do Rio Doce, sub-bacia do rio Piranga e micro-bacia do rio Turvo Sujo. A deposição de lixo no local foi encerrada há cerca de 5 anos.



Figura 6 – Vista geral da área subjacente ao depósito de lixo.

3.2. Clima

A cidade de Viçosa insere-se numa região cujo clima é caracterizado por apresentar verões frescos e chuvosos. Apresenta temperatura média anual de 19,8 °C, com uma média das mínimas, no mês de julho, de 15,9 °C, e das máximas, no mês de fevereiro, de 22,7 °C, valores calculados com base nos dados dos últimos 20 anos.

De acordo com dados obtidos na Estação Climatológica de Viçosa, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia, do Ministério da Agricultura, no período de 1931 a 1960 foram registradas, na cidade, temperaturas mínimas de 0 °C, no dia 10/06/1933 e máxima de 35,2 °C no dia 17/01/1956. Em 10/09/97 registrou-se a temperatura de 37,6 °C, máxima ocorrida até hoje.

A média de precipitação pluviométrica no período de 1980 a 1999 foi de 1.227,10 mm/ano, conforme está apresentado no Quadro 4 e na Figura 7, com a maior incidência de chuvas ocorrendo no período de outubro a março, sendo o pico em dezembro, de acordo com os dados da Estação Climatológica de Viçosa.

A umidade relativa do ar varia de 31 a 60% ao ano.

No outono, inverno e primavera ocorre a predominância da massa tropical atlântica e, no inverno principalmente, são comuns as inversões da massa polar atlântica, que provocam chuvas frontais.

Quadro 4 – Média das precipitações mensais do Município de Viçosa (MG)

Meses	Precipitação Média Mensal (P) em mm	Evapotranspiração (ET) em mm
Janeiro	216,80	110,00
Fevereiro	112,90	95,90
Março	150,00	95,80
Abril	53,50	40,10
Mai	32,80	50,50
Junho	23,60	13,60
Julho	12,90	14,20
Agosto	18,10	16,90
Setembro	53,40	32,00
Outubro	103,00	58,30
Novembro	209,60	92,00
Dezembro	240,50	103,90
TOTAL	1.227,10	723,00

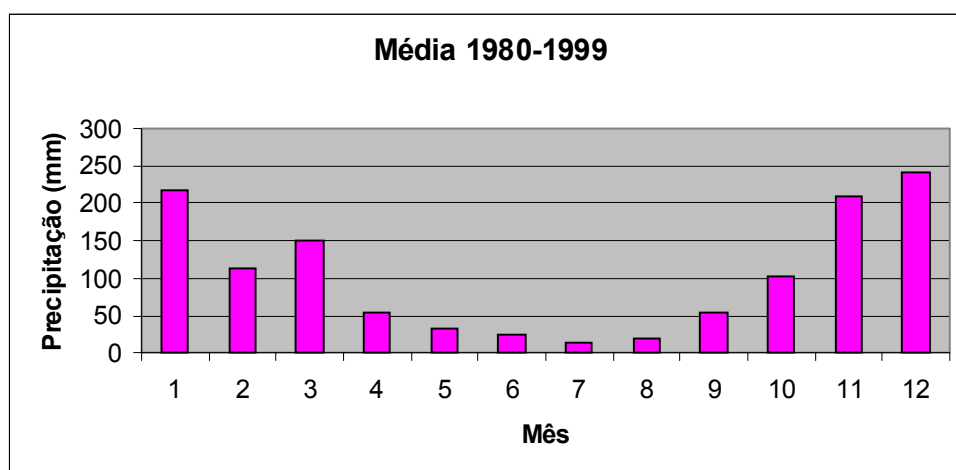


Figura 7 - Média das precipitações (mm) totais mensais entre 1980 e 1999.

3.3. Geomorfologia

As serras e planaltos do leste e sudeste mineiros inserem-se no Planalto Atlântico do Brasil Sudeste, uma das unidades do Planalto Brasileiro.

A região de Viçosa (MG) integra o Domínio dos Planaltos Cristalinos Rebaixados, situando-se entre as escarpas da Serra da Mantiqueira (Planalto do Alto Rio Grande), a leste, e o prolongamento da Serra do Caparaó, a oeste (VIEIRA, 2000).

3.4. Geologia

O Município de Viçosa está inserido em um domínio que apresenta, localmente, gnaisses indiferenciados, moderadamente a muito alterados, apresentando níveis quartzosos intercalados com níveis micáceos (biotita, principalmente), de espessuras milimétricas a centimétricas. São encontrados freqüentemente corpos intrusivos tabulares ou lenticulares de rochas básicas e metabásicas, às vezes bastante fraturados e alterados.

Aspectos da geologia local do Município de Viçosa (MG) foram citados por VIEIRA (2000), que caracterizou, macro e microscopicamente, os tipos litológicos presentes na região.

3.5. Solos

Ao realizar a caracterização geotécnica dos solos de Viçosa (MG), VIEIRA (2000) descreveu um total de cinco horizontes: saprolitos (material de transição solo-rocha), solo residual jovem, solo residual maduro, solo coluvionar e depósitos aluvionares.

Os saprolitos constituem-se de massas predominantemente terrosas, friáveis e não estruturadas que, em profundidade, transicionam para núcleos rochosos com grau de decomposição variável. Esta condição de horizonte de transição entre solos residuais e rocha reflete em comportamentos e propriedades geotécnicas heterogêneas destes materiais. A espessura deste horizonte varia em função do seu posicionamento na encosta. As maiores

freqüências situam-se entre 0 e 5 m, mas ocorrem também espessuras superiores a 20 m.

O solo residual jovem (horizonte C) ocorre sobrejacente aos saprolitos e subjacente ao solo residual maduro, aflorando em cortes de estradas, paredes de voçorocas ou em porções de maior declividade das encostas. Apresentando constituição predominantemente areno-siltosa, é um material pouco coesivo, de baixa plasticidade e altamente susceptível à erosão superficial. Possui espessura média entre 5 e 7 m, também atingindo valores superiores a 20 m na região dos topos dos morros.

O solo residual maduro (horizonte A e B) ocorre praticamente em toda a área estudada, com granulação fina, predominantemente argilo-arenosa. Apresenta plasticidade média a alta e coloração marrom ou marrom-avermelhada. As espessuras variam, de acordo com a posição topográfica, entre 3 e 6 m. É um material pouco susceptível à erosão superficial, por ser fortemente estruturado, e muito utilizado em obras de terra.

O solo coluvionar possui características muito semelhantes às do solo residual maduro, sendo, em muitos casos, de difícil diferenciação. Possuem granulação predominantemente fina, geralmente argilo-silto-arenosa, com plasticidade média a alta, homogêneos, porosos, e com coloração marrom, marrom-avermelhada e marrom-amarelada. Geralmente pouco espesso, estes solos apresentam maiores espessuras nas partes altas de encostas suaves. Tem sido, também, utilizado como matéria prima em obras de terra.

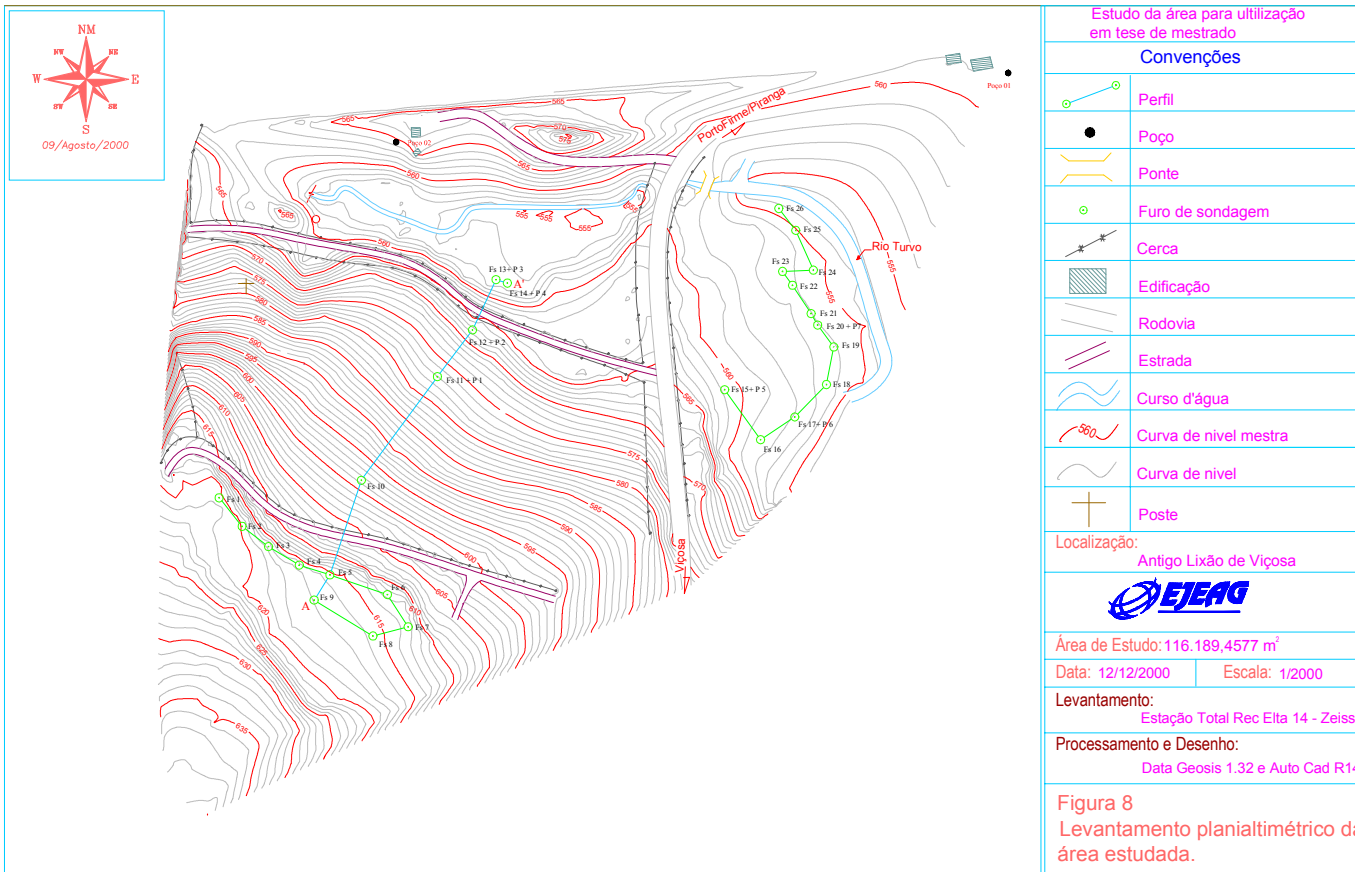
Os depósitos aluvionares são, em geral, pouco desenvolvidos, ocorrendo junto aos leitos e terraços fluviais. São considerados de menor importância, devido à sua pequena abrangência espacial. Apresentam granulometria variável, predominando constituições argilo-silto-arenosas.

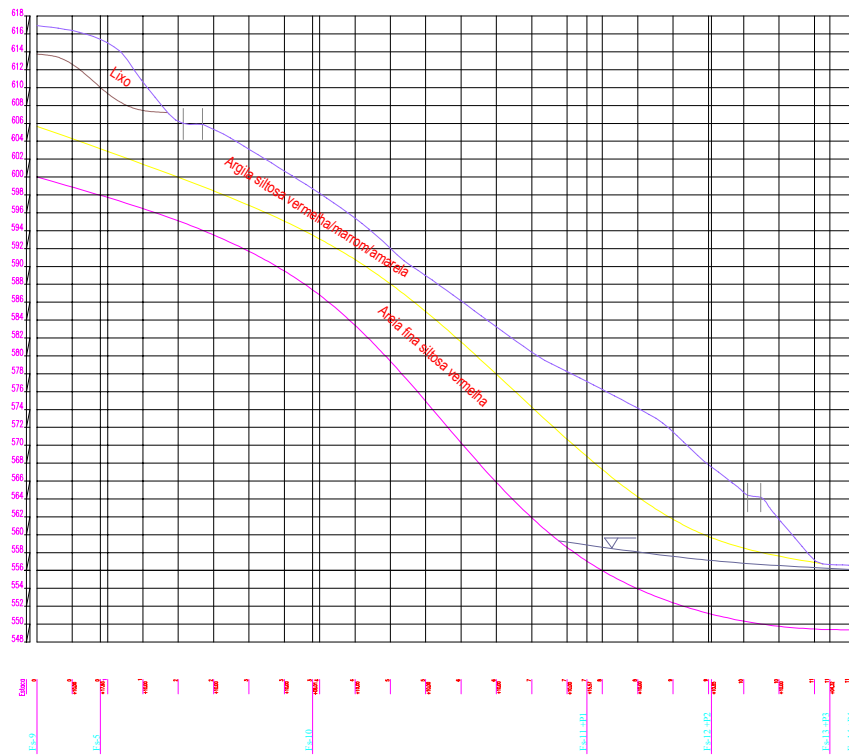
3.6. Trabalhos de campo e laboratório

O levantamento topográfico planialtimétrico da área em que se encontra o antigo “lixão” da cidade de Viçosa (área de depósito, a estrada de acesso, parte da rodovia e uma área de depósito depois da rodovia junto ao rio Turvo Sujo) foi executado pela Empresa Júnior de Engenharia de Agrimensura da Universidade Federal de Viçosa e a análise dos dados de leitura de campo

foi feita com o auxílio de um software topográfico, Data Geosis (versão 1.32) e um software gráfico AutoCad R14, que possibilitou uma apresentação adequada.

Na Figura 8 está apresentado o levantamento planialtimétrico da área do antigo “lixão” do município de Viçosa (MG) e na Figura 9, o traçado do perfil longitudinal da área, ao longo da secção A-A’.





Estudo da área para utilização em tese de mestrado

Convenções

	Perfil longitudinal do terreno
	Lixo
	Argila arenosa verm./marrom/amarela
	Areia fina siltosa vermelha
	Nível d'água
	Estrada

Mestrando: André Luciano de Carvalho

Localização: Antigo Lixão de Viçosa

Município: Viçosa - MG

Área de Estudo: 116.189,4577 m²

Data: 12/12/2000 Escala: H: 1/1000 V: 1/400

Levantamento: Estação Total Rec Elta 14 - Zeiss

Processamento e Desenho: Data Geosis 1.32 e Auto Cad R14

Figura 9
Perfil longitudinal A - A'

3.6.1 Sondagens de simples reconhecimento

Os ensaios de sondagens foram executados pela equipe de técnicos do Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa.

Foram executados 26 furos de sondagens em toda a área de estudo. Dos 26 furos de sondagens, 9 furos foram revestidos com diâmetros de 1” e 2” e em 7 foram instalados piezômetros para coleta de amostras de água. A cada metro de profundidade eram colhidas amostras pela cravação do amostrador-padrão. Estas amostras “deformadas” foram guardadas em sacos plásticos e, posteriormente, usadas para caracterizar o horizonte de solo em que se encontrava o amostrador naquele instante.

Os resultados das sondagens à percussão serão apresentados no capítulo 4.

3.6.2. Instalação de piezômetros

Na área de estudo existiam 2 poços utilizados para consumo doméstico de água, que foram usados para análise da água, diminuindo-se, dessa forma, maiores gastos com perfuração de furos para instalação de piezômetros. Um deles, o poço 01 situa-se a aproximadamente 50 m da margem do rio Turvo Sujo e, o outro, o poço 02 situa-se depois da rodovia, ambos em residências próximas à área de depósito de lixo.

A construção dos piezômetros de monitoramento de aquífero freático foi feita de acordo com a Norma CETESB 06.010 de abril de 1988.

Foram instalados 7 piezômetros para medir a poro-pressão e extrair água para posterior análise.

Os piezômetros, conforme está mostrado na Figura 10, foram instalados com tubo de PVC de diâmetros de 1” e 2” com comprimento variável. Nos tubos foram feitos rasgos na parte inferior com lâmina de serra comum, impondo o funcionamento de um filtro revestido com manta bidim. No espaço anular entre o tubo e o furo foi introduzida, até uma certa altura, areia grossa para que funcionasse como estabilizador da formação. Na parte superior foi injetada lama de bentonita, constituindo-se o denominado “selo sanitário”. Por

fim, colocou-se tampa de PVC nos piezômetros e adequou-se, de forma discreta, um tubo de ferro que dificultava a abertura dos mesmos por pessoas não autorizadas. A locação desses piezômetros podem ser verificados na planta de topografia, mostrados na Figura 8.



Figura 10 – Instalação de piezômetro.

3.6.3. Coleta e análise d'água

A coleta de amostra das águas dos piezômetros de monitoramento obedeceu o que está estabelecido no Guia da CETESB (1988) para amostragem de águas subterrâneas, sendo realizada 2 vezes ao longo de um período de 6 meses, com início no mês de outubro de 2000 e término no mês de abril de 2001.

Para se fazer a coleta foi construído um instrumento eficaz e portátil, que servisse tanto para o esvaziamento dos poços, como para a coleta das amostras. O coletor de águas foi feito em tubos e conexões de PVC com diâmetro de 2 cm e comprimento de 60 cm (Figura 11).

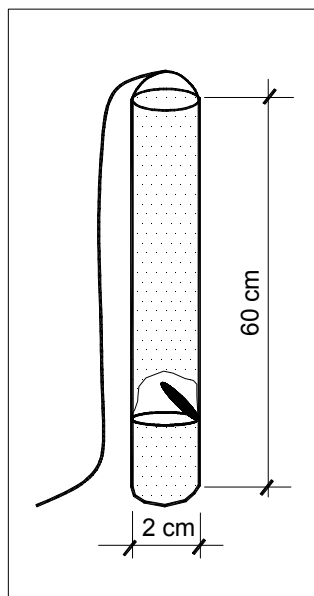


Figura 11 – Coletor de amostragem de água.

Antes de se fazer a coleta da água dos piezômetros, dos poços e do rio, extraía-se um volume de água equivalente a 3 vezes o volume a ser colhido, pois a primeira água que é extraída não representa a água do aquífero. Esse coletor, toda vez que infiltrava no piezômetro, poço ou rio, era esterelizado com cloro, tomando-se o cuidado de não contaminar o próximo.

As amostras coletadas foram acondicionadas em garrafas do tipo “PET”, esterelizadas e previamente lavadas com água dos mesmos piezômetros, poços e rios, fazendo a ambiência das mesmas. Após a coleta das águas, as amostras foram transportadas para o Laboratório de Qualidade de Água do Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental, para análises físicas, químicas e bacteriológicas e depois para o Laboratório de Espectrofotometria de Absorção Atômica do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, para quantificação dos metais pesados presentes nas amostras.

3.6.4. Determinação das propriedades geotécnicas do solo

A obtenção dos parâmetros dos solos na região do lixão foi feita a partir da retirada de 2 blocos de amostras indeformadas de solo de 40x40x40 cm, de acordo com a norma NBR 9604/86 (“Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo com retirada de amostras deformadas e indeformadas”). Um bloco foi retirado a 3,00 m e outro a 7,00 m de profundidade, medidos a partir da superfície do terreno até o centro de gravidade da amostra, que serão doravante denominados, nesta tese, de “Argila 3,00 m” e “Argila 7,00m”.

O procedimento adotado para a retirada destes blocos de amostras foi a abertura de um poço de inspeção de 1,20 m de diâmetro, construído a aproximadamente a 4,00 m do lado do furo de sondagem FS-11. Os blocos foram moldados com espátula e, posteriormente, recobertos com parafina, a fim de preservar a umidade natural. Estes blocos de amostras foram devidamente acondicionados em caixas apropriadas e transportados para o Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, onde foram mantidos em câmara úmida até a moldagem dos corpos de prova.

Para caracterização do material foram determinados o teor de umidade, os limites de Atterberg, o peso específico dos sólidos e o ensaio de granulometria conjunta.

Os ensaios seguiram, fundamentalmente, as especificações descritas pela ABNT, de acordo com o que é apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 – Ensaio de caracterização

ENSAIOS	NORMAS
Peso Específico dos Sólidos (γ_s)	ABNT NBR 6508/84
Análise Granulométrica	ABNT NBR 7181/84
Limite de Liquidez (LL)	ABNT NBR 6459/84
Limite de Plasticidade (LP)	ABNT NBR 7180/84

Em seguida, foram realizados os ensaios de permeabilidade e ensaio em coluna de lixiviação.

Os parâmetros obtidos nos ensaios de caracterização e as curvas granulométricas dos solos “Argila 3,00 m” e “Argila 7,00 m” serão apresentados no capítulo 4.

A determinação do coeficiente de permeabilidade dos solos do antigo lixão foi feita com uso de permeômetros de carga variável. Os resultados destes ensaios serão apresentados no capítulo 4.

3.6.5. Ensaio em coluna de lixiviação

A modelagem do movimento de água e transporte de solutos no solo é importante para a compreensão dos mecanismos a serem disponibilizados para reduzir a poluição das águas superficiais e subterrâneas. A possibilidade de prever o movimento de solutos no solo por meio de modelos computacionais, baseados na equação de transporte difusivo-dispersivo-convectivo, permite uma grande economia de tempo e de recursos financeiros, os quais seriam gastos em estudos experimentais (CLEMENTE et al., 1993). No entanto, a aplicabilidade de modelos de simulação só é possível mediante o conhecimento de algumas variáveis, cuja quantificação está sujeita a erros de determinação. Dentre as variáveis envolvidas no transporte do soluto no solo estão a condutividade hidráulica, o coeficiente de dispersão-difusão e o fator de retardamento. Uma preocupação na obtenção destas variáveis, em colunas de solo saturado, refere-se ao processo de amostragem no solo. No método tradicional, ao cravar-se por percussão o cilindro de amostragem, há quebra e deformação da estrutura original do solo. Outra preocupação refere-se ao escoamento preferencial que pode ocorrer entre a amostra de solo e as paredes do cilindro amostrador, o que representa uma possível causa de erros na determinação dos parâmetros da equação do transporte de solutos. Várias alternativas tem sido empregadas na tentativa de amenizar estes problemas, tais como: cilindros de maior diâmetro, colunas de solo de maior altura e coleta do escoamento somente na parte central da amostra. KLUTE e DIRKSEN (1986) recomendam a utilização de cilindros amostradores da ordem de 2 a 10 cm de diâmetro e 5 a 25 cm de altura para a determinação, em laboratório, da condutividade hidráulica do solo saturado. BAGARELLO e PROVENZANO (1986) investigaram a influência do tamanho da coluna de solo na

determinação da condutividade hidráulica e verificaram que, para as maiores colunas, houve uma menor variação nos valores obtidos devido a uma redução do escoamento preferencial entre a amostra de solo e as paredes do cilindro amostrador.

Com o objetivo de determinar os fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão dos metais Zn, Cd, Cu e Pb, utilizou-se neste estudo os corpos de prova indeformados dos solos “Argila 3,00 m” e “Argila 7,00 m”.

A metodologia utilizada para o desenvolvimento destes ensaios foi a apresentada por MATOS (1995) da seguinte forma:

- As colunas de solo foram montadas em permeâmetro de carga constante.

- O sistema de percolação, conforme é mostrado na Figura 12, foi composto por um conjunto de alimentação automática (frascos de Mariotte), estrutura de acondicionamento das colunas e recipientes de coletas de efluentes, sendo montado de forma a permitir a avaliação, ao mesmo tempo, de todos os materiais de solo, inclusive colunas testemunhas (materiais que não receberam solução contaminada, mas, apenas água deionizada).

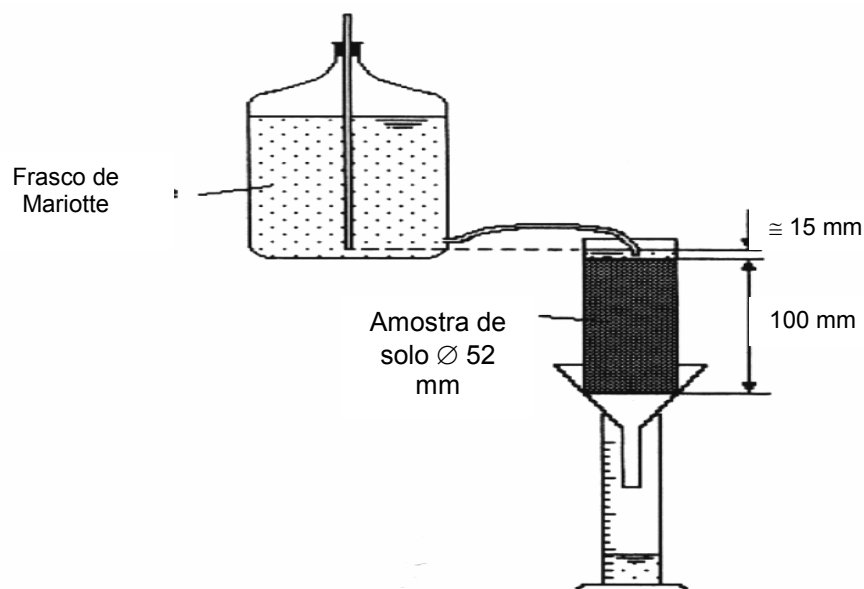


Figura 12– Esquema do ensaio de coluna de lixiviação.

A preparação dos corpos de prova foi da seguinte maneira:

- Inicialmente foram moldados 6 corpos de prova, sendo 3 corpos de prova com o material de solo da cota de 3,00 m e 3 corpos de prova com o material de solo da cota de 7,00 m. Os corpos de prova tiveram 10 cm de altura e 5,2 cm de diâmetro.
- Dos corpos de prova, foram determinados o teor de umidade, o peso específico e a porosidade.
- Na base da coluna, colocou-se um anel de PVC, com diâmetro igual ao do cilindro com altura de 1,0 cm para fixar um disco de lã de vidro e uma tela de nylon com o objetivo de impedir o carreamento de partículas (Figura 13).



Figura 13 – Anel de PVC com lã de vidro e tela de nylon.

- O corpo de prova foi colocado concentricamente sobre o anel de PVC (Figura 14).



Figura 14 – Colocação do corpo de prova sobre o anel de PVC.

- No topo da coluna, colocou-se um cilindro de PVC de 5,2 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura para facilitar a colocação da parafina e, depois, colocou-se esse conjunto dentro de um cilindro de PVC de 6,0 cm de diâmetro e 13,0 cm de altura (Figura 15).



Figura 15 – Cilindro de PVC.

- O espaço entre a amostra de solo e o cilindro de PVC foi preenchido com uma mistura de 70% parafina mais 30% de vaselina (Figura 16). Esta mistura foi dissolvida e utilizada com o objetivo de impedir o escoamento preferencial entre a amostra de solo e o cilindro amostrador.



Figura 16 – Detalhe do preenchimento do espaço entre a coluna de solo e o cilindro de PVC.

- Após a solidificação da mistura, as colunas foram colocadas para saturar, por capilaridade, durante 24 horas, a partir de suas bases, dentro de um recipiente com água deionizada com uma altura de 2/3 de do corpo de prova, conforme mostrado na Figura 17.



Figura 17 – Detalhe da saturação das amostras por capilaridade.

- Após saturação por capilaridade, iniciou-se o ensaio de colunas de solo montadas em permeâmetro de carga constante.
- Montado o sistema no Laboratório de Água e Solo do Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal de Viçosa, todas as 6 colunas foram interligadas ao mecanismo de alimentação, recebendo, inicialmente, água deionizada, situação que permaneceu até que o fluxo d'água, em cada amostra de solo atingisse o regime permanente (Figura 18).



Figura 18 – Vista do sistema de alimentação com água deionizada.

- Atendida essa condição, cessou-se a alimentação das colunas e esperou-se que a lâmina de água deionizada, com altura de aproximadamente 1,9 cm Amostra 1; 2,3 cm Amostra 2; 1,4 cm Amostra 3; 2,1 cm Amostra 4; 3,1 cm Amostra 5; 2,0 cm Amostra 6, infiltrasse completamente no solo, para que, instantaneamente, fosse iniciada a alimentação de solução contaminante sobre as colunas de solo.
- Quando formavam-se bolhas de ar nos tubos de alimentação das colunas era necessário tirá-las. Para isso, à medida que fossem balançados os frascos de Mariotte para retirar as bolhas de ar, a lâmina d'água aumentava e com isso era necessário nivelá-las retirando o excesso de água deionizada no topo da coluna de solo com o auxílio de uma seringa de plástico, eliminando-se a água retirada, conforme é mostrado na Figura 19.



Figura 19 – Detalhe da retirada de água deionizada em excesso no topo das colunas de lixiviação.

A solução contaminante aplicada nas colunas consistiu de um “coquetel” contendo 20 mg/L de cádmio (Cd), 700 mg/L de zinco (Zn), 200 mg/L de cobre (Cu) e 300 mg/L de chumbo (Pb). O “coquetel” foi preparado utilizando sais nitrato destes elementos químicos, dissolvidos em água deionizada. Os valores foram escolhidos com base nas concentrações de metais pesados sugeridas por MATOS (1995).

Na Figura 20 estão mostradas os corpos de prova sendo submetidos ao escoamento permanente, em condições de saturação, do “coquetel” de metais pesados.



Figura 20 – Detalhe do sistema em operação, com os corpos de prova recebendo o “coquetel” de metais pesados, para a ocorrência do escoamento permanente, em condições de saturação.

Na Figura 21 é mostrado, em detalhe, a forma de coleta do efluente das colunas de lixiviação.



Figura 21 – Detalhe da forma de coleta dos efluentes das colunas de lixiviação.

- Os efluentes foram coletados em frascos totalmente esterelizados de numeração sequenciada e volumes conhecidos (Figura 22), de forma a se obter um acompanhamento na variação da concentração de metais com o volume efluente igual a, no mínimo 15 volume de vazios da amostra de solo (volume de poros).



Figura 22 – Vista dos frascos utilizados para a coleta do efluente das colunas de lixiviação.

- Após a coleta de 25 mL de solução efluente em, aproximadamente, 480 frascos, foi adicionada 01 gota de ácido nítrico (HNO_3) em cada frasco com o objetivo de evitar a adsorção de metais nas paredes dos frascos. As soluções foram levadas para análise, em aparelho de espectrofotometria de absorção atômica, no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa para determinação das concentrações de Cd, Zn, Cu e Pb. Os valores das concentrações médias dos frascos foram relacionados ao do volume total de efluente drenado até então.

- De posse dos dados de concentração relativa C/C_0 (relação entre a concentração do metal em cada frasco pela concentração da solução contaminante) correspondente ao volume de poros de cada amostra, foram traçadas as curvas de eluição de cada metal em cada amostra de solo ensaiada.

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos trabalhos feitos no campo e no laboratório, bem como a caracterização dos resíduos sólidos provenientes da cidade de Viçosa (MG).

4.1. Sondagens de simples reconhecimento

No Quadro 6 está apresentado o resumo dos ensaios de sondagem realizados. As sondagens 01 a 08 serviram para determinar a extensão e a espessura da camada de lixo depositada na parte superior do talude. A sondagem 09 além de servir para o mesmo propósito, foi utilizada juntamente com as sondagens 10 a 14 para definição do perfil geotécnico, ao longo da secção A-A', apresentado na Figura 8 do capítulo anterior.

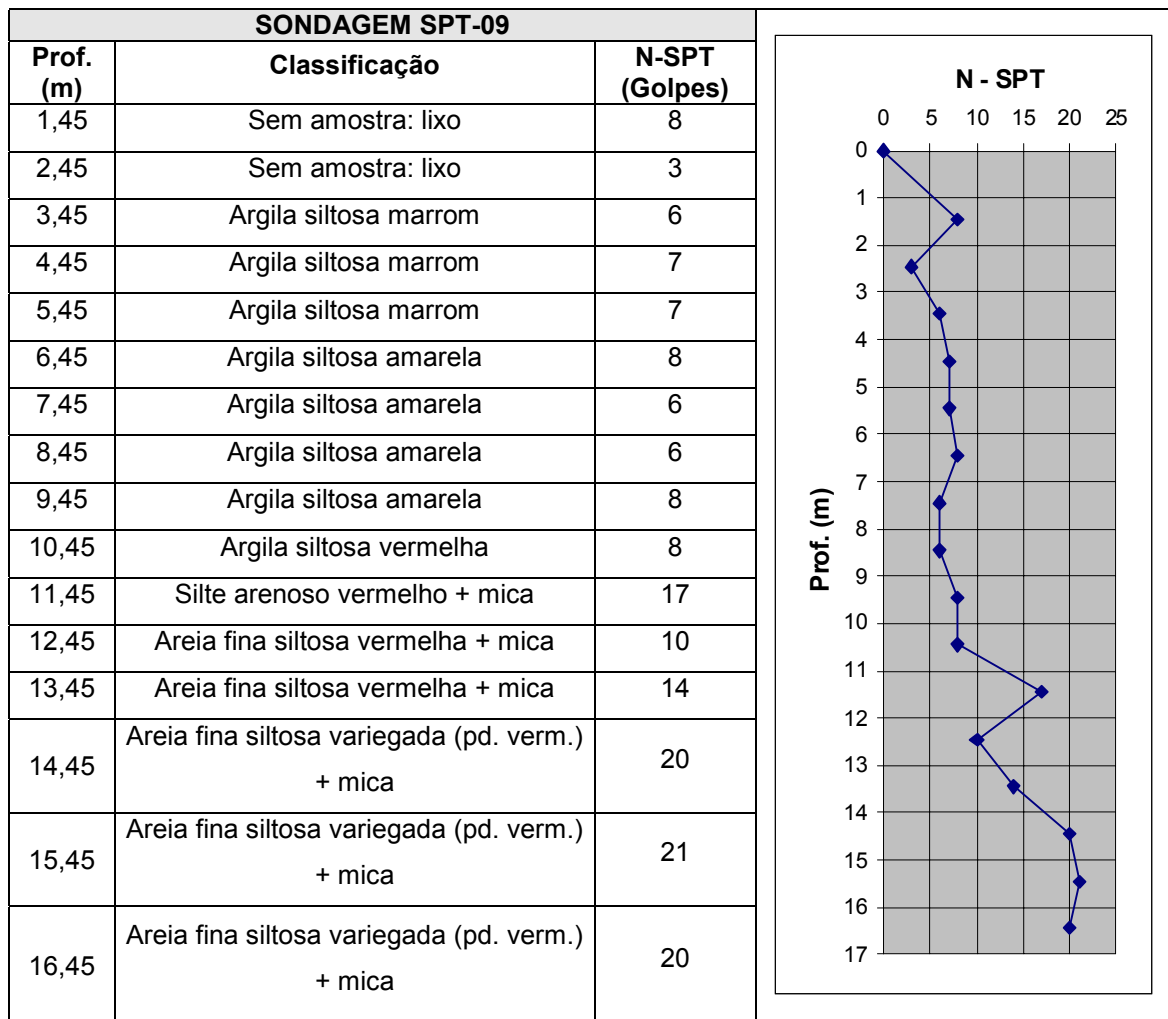
As sondagens 15 a 26, feitas entre a rodovia e o Rio Turvo Sujo, serviram para determinar a extensão e a espessura do lixo depositado nesta área. Como a extensão deste depósito era pequena e a camada de lixo tinha pequena espessura, decidiu-se não estudar numericamente a contaminação nesta área.

Quadro 6 – Resultado das sondagens

Furo de Sondagem FS	Profundidade (m)	Classificação
01	2,70	Lixo
02	4,50	Lixo
03	4,70	Lixo
04	5,50	Lixo
05	5,50	Lixo
06	6,70	Lixo
07	4,70	Lixo
08	5,70	Lixo
09	16,45	Vide quadro 7
10	11,45	Vide quadro 8
11	19,45	Vide quadro 9
12	12,45	Vide quadro 10
13	6,45	Vide quadro 11
14	1,45	Vide quadro 12
15	7,45	Lixo
16	3,45	Lixo
17	5,45	Lixo
18	1,80	Lixo
19	1,30	Lixo
20	4,45	Lixo
21	1,40	Lixo
22	1,30	Lixo
23	0,60	Lixo
24	1,30	Lixo
25	1,20	Lixo
26	0,60	Lixo

Nos Quadros 7 a 12 estão apresentados os resultados das sondagens 09 a 14 que serviram para definição do perfil geotécnico ao longo da secção A-A' (Figura 9, Capítulo 3).

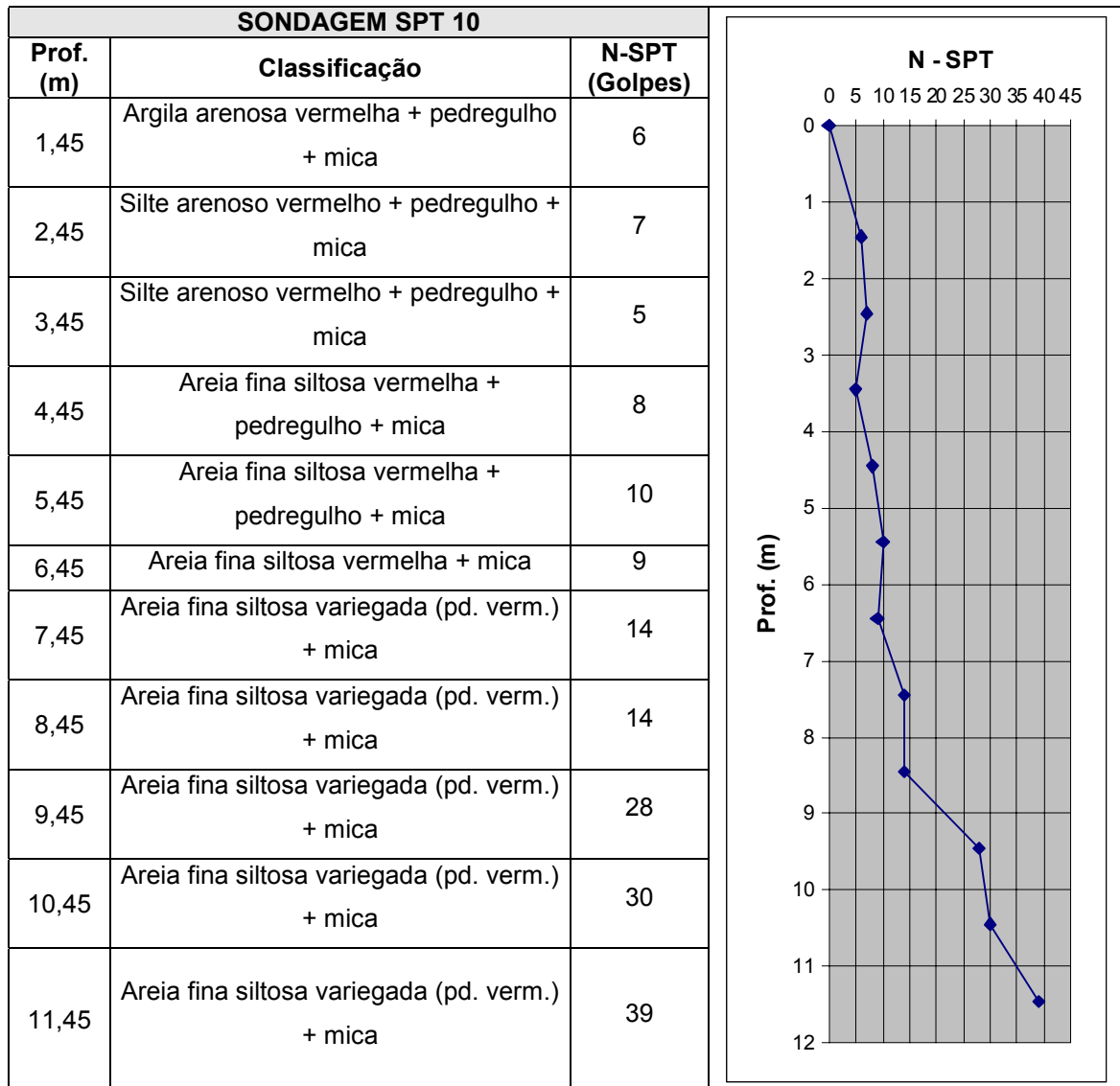
Quadro 7 – Resultado da sondagem SPT-09



- Não foi encontrado o nível d'água.

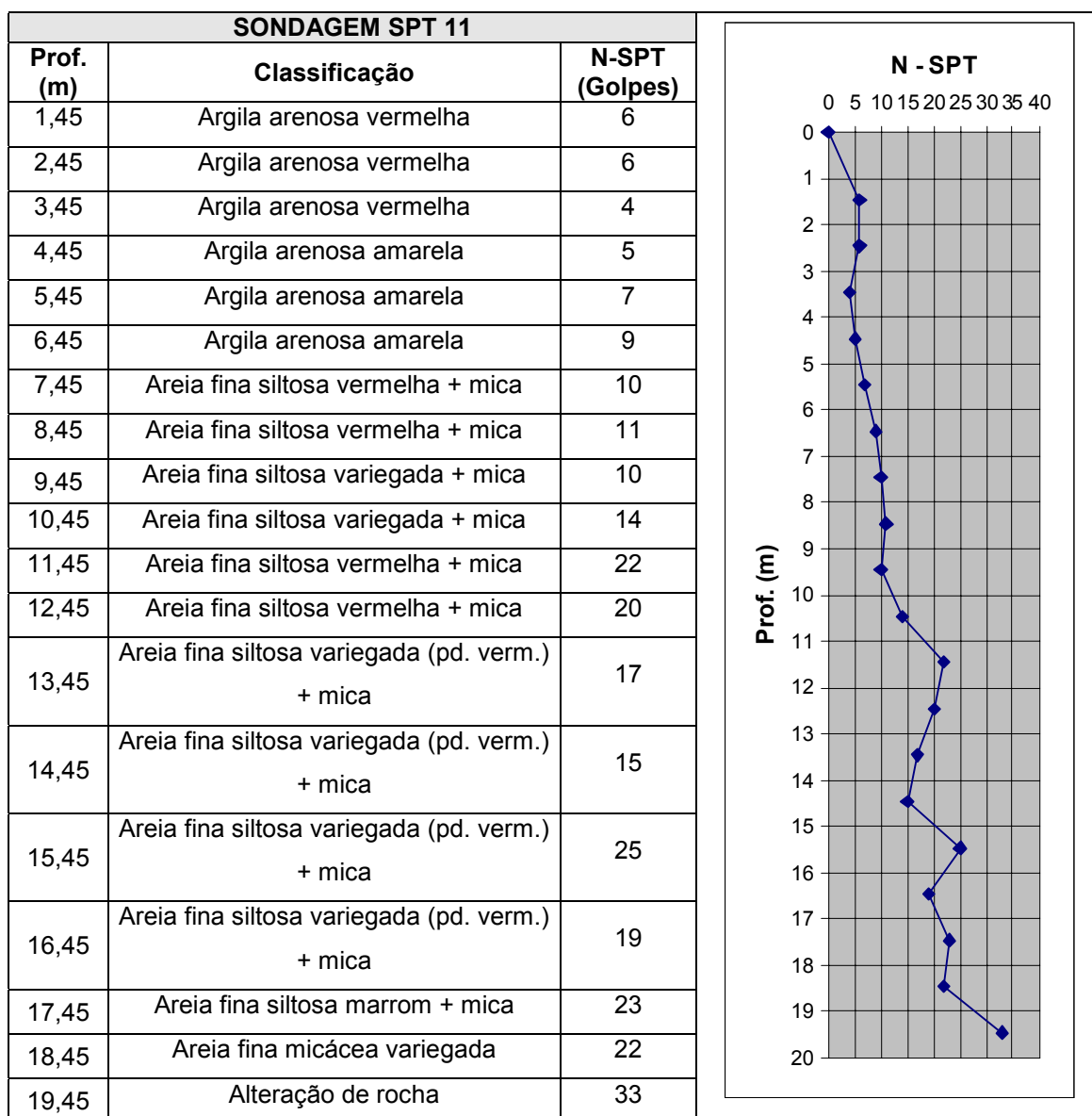
- Sem revestimento.

Quadro 8 – Resultado da sondagem SPT-10



- Não foi encontrado o nível d'água.
- Sem revestimento.

Quadro 9 – Resultado da sondagem SPT-11

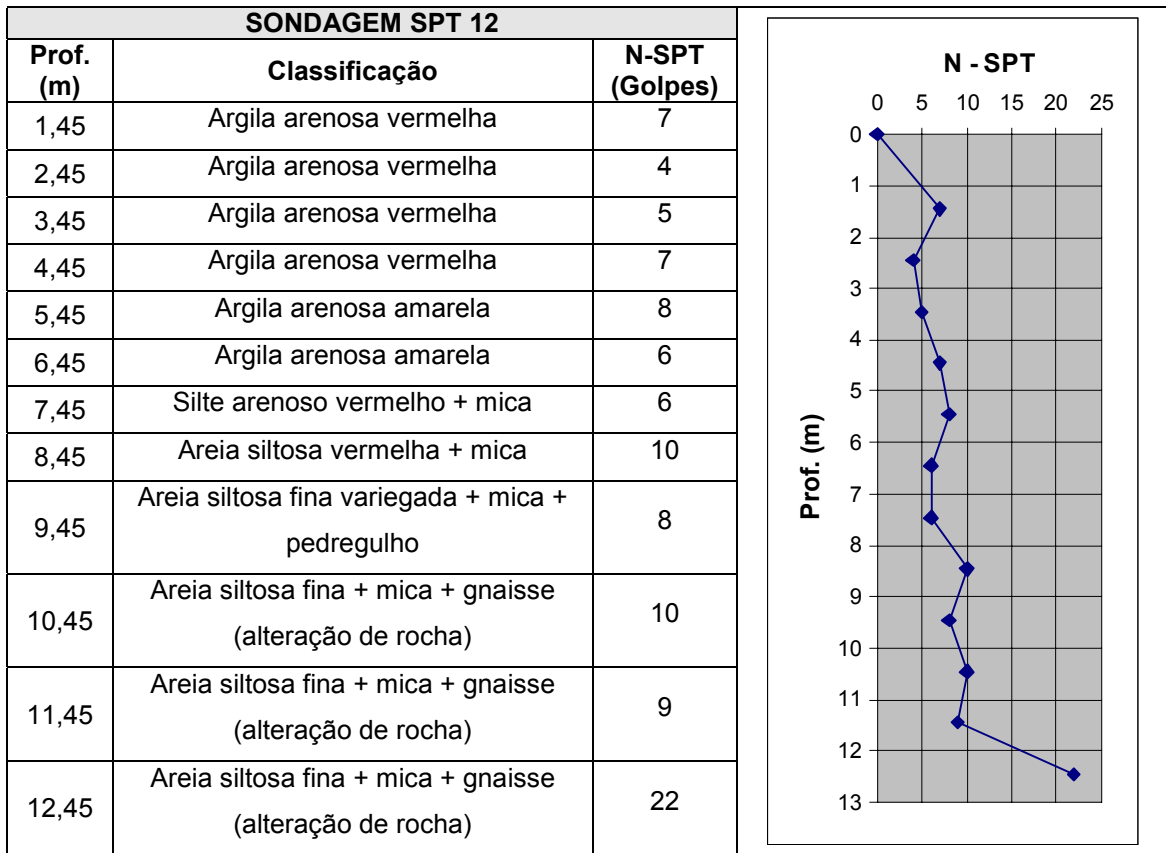


• Piezômetro nº 01:

• Nível d'água inicial: 18,70 m.

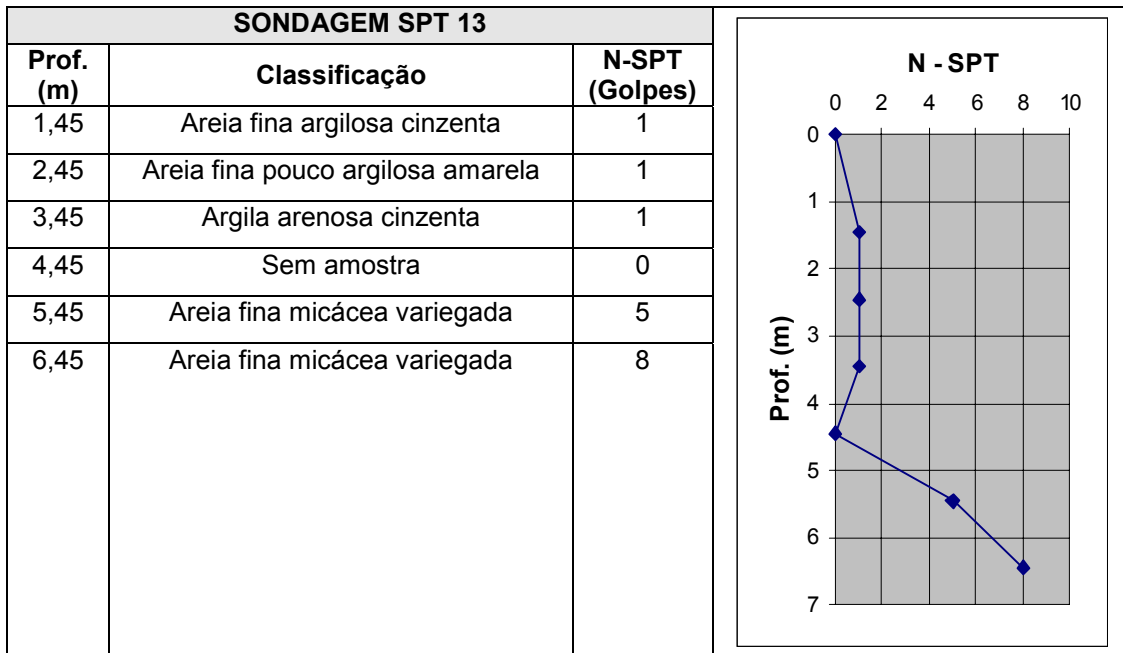
• Revestido com tubo de PVC de Ø 1”.

Quadro 10 – Resultado da sondagem SPT-12



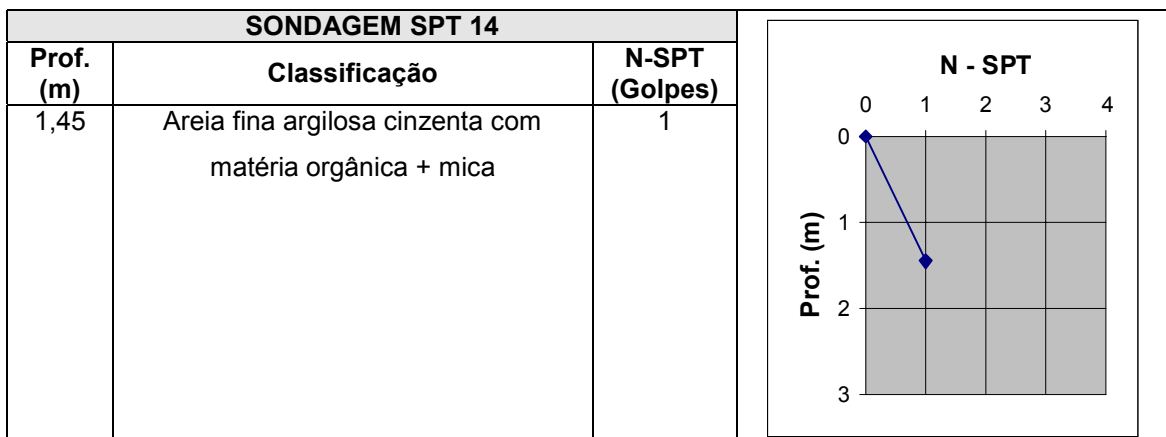
- Piezômetro nº 02:
- Nível d'água inicial: 10,90 m.
- Revestido com tubo de PVC de \varnothing 1".

Quadro 11 – Resultado da sondagem SPT-13



- Piezômetro nº 03:
- Nível d'água inicial: 0,30 m.
- Revestido com tubo de PVC de \varnothing 1" .

Quadro 12 – Resultado da sondagem SPT-14



- Piezômetro nº 04:
- Nível d'água inicial: 0,30 m.
- Revestido com tubo de PVC de \varnothing 2" .

Em função dos resultados de sondagens, definiu-se o perfil geotécnico ao longo da secção A-A' como sendo composto de 2 camadas de solo, uma de argila siltosa com cor variável e outra de areia fina siltosa vermelha, sobrejacentes à camada de alteração de rocha (Figura 9, Capítulo 3).

Conforme pode ser verificado nos resultados de sondagens e na Figura 9 do Capítulo 3, o nível d'água só foi atingido na parte inferior do talude estudado.

Os 2 blocos de amostra indeformada foram retirados a partir de um poço escavado nas proximidades do furo de sondagem número 10. Um bloco foi extraído a 3,00 m de profundidade e o outro a 7,00 m de profundidade. Por falta de recursos, não foi possível continuar a escavação do poço, de maneira a poder-se extrair um bloco de amostra indeformada da camada de areia fina siltosa.

4.2. Propriedades geotécnicas do solo

No Quadro 13 estão apresentados os parâmetros obtidos nos ensaios de caracterização dos solos.

Quadro 13 - Resultado dos ensaios de caracterização

Prof. (m)	Granulometria				Limites de Atterberg			Índices Físicos				
	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedr (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	W (%)	γ_s (kN/m ³)	e_{nat}	S (%)
3,00	54	10	33	3	65,80	31,50	34,30	14,25	26,05	27,10	1,40	50,10
7,00	44	15	32	9	64,00	29,94	34,06	18,85	20,41	27,00	0,72	75,50

Os solos foram classificados de acordo com a ASTM D 2487-85 e a Carta de Plasticidade de CASAGRANDE como sendo **“Argila arenosa de plasticidade elevada (CH)”**.

Nas Figuras 23a e 23b estão apresentadas as curvas granulométricas do solo “Argila 3,00 m” e “Argila 7,00 m”.

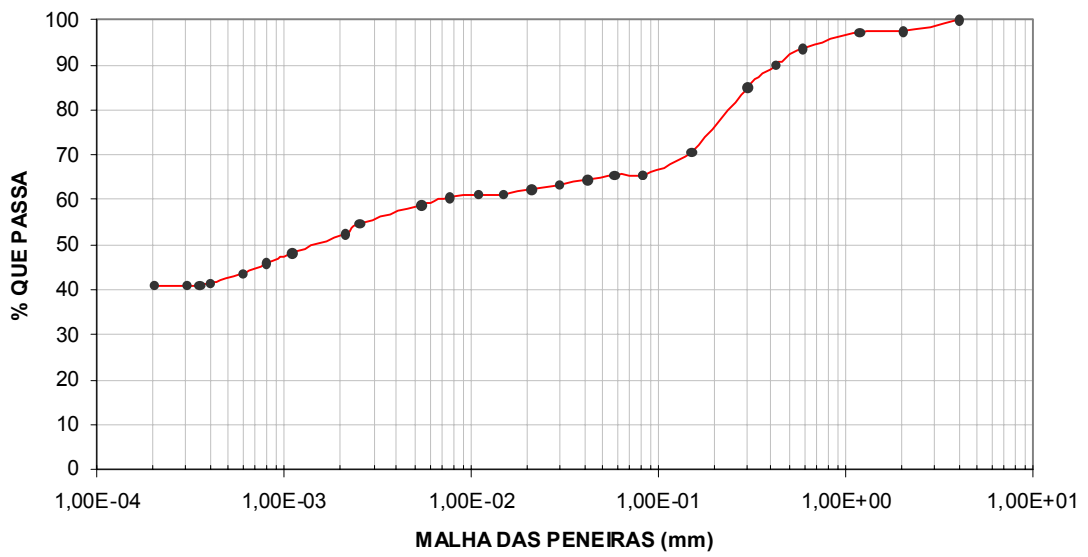


Figura 23a - Curva granulométrica para o solo da profundidade de 3,00 m.

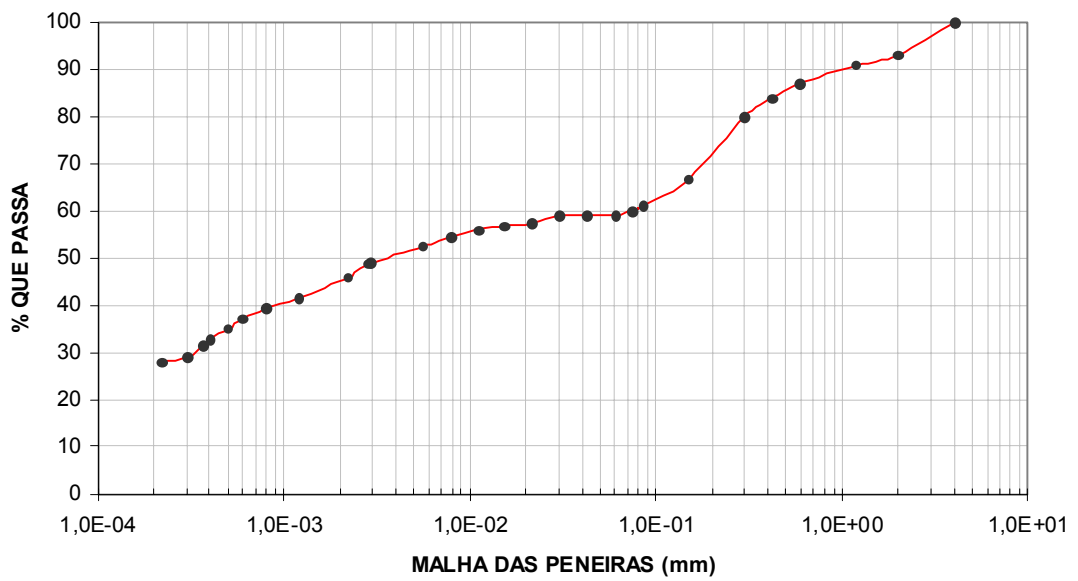


Figura 23b - Curva granulométrica para o solo da profundidade de 7,00 m.

No Quadro 14 estão apresentados os resultados dos ensaios de permeabilidade das amostras de solo “Argila 3,00 m” e “Argila 7,00 m”.

Quadro 14 - Resultado dos ensaios de permeabilidade das amostras de solo

Profundidade (m)	Classificação	Permeabilidade Natural (cm/s)
3,00	Argila arenosa de plasticidade elevada	$9,32 \times 10^{-4}$
7,00	Argila arenosa de plasticidade elevada	$2,68 \times 10^{-4}$

4.3. Caracterização dos resíduos sólidos gerados na cidade de Viçosa (MG.).

Em geral, o lixo tem uma composição bastante variada, resultado, principalmente, das características ambientais e socioeconômicas da população que o gera. Assim, fatores como clima, variações sazonais, grau de educação, poder aquisitivo, hábitos e costumes, etc., influenciam na composição do lixo. Dessa forma, o lixo gerado em um país é diferente do lixo gerado em outro. E, dentro de um mesmo país, o lixo apresenta, em sua composição, variações entre as regiões, cidades, bairros e residências. Em municípios de pequeno porte (população urbana menor que 10.000 hab.), por ser comum a coleta ser feita simultaneamente em várias áreas de geração de lixo, essa variação não é tão expressiva.

A característica do lixo é um fator básico para se determinar a forma de acondicionamento, transporte, tratamento e destinação final.

Um parâmetro que bem expressa a característica do lixo é sua composição gravimétrica, que expressa o peso e o valor percentual (com relação ao peso total) de cada componente da massa de lixo.

No Quadro 15 está mostrada a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Viçosa (MG), em 31/03/2000, dados fornecidos pelo Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa.

Quadro 15 – Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Viçosa (MG)

COMPONENTES	% EM PESO	GRUPO	% EM PESO
Papel e papelão	9,36	VIDRO	2,50
Plástico duro	3,15		
Plástico filme	1,65		
Vidro	2,50	METAL	2,90
Latas	2,45		
Metais diversos	0,45		
Borracha	0,16	PLÁSTICO	4,80
Louças	0,12		
Madeiras	0,56		
Trapos	0,55	PAPEL	9,36
Outros	3,75		
Matéria orgânica	75,30	MAT. ORG. E OUTROS	80,44

O lixo foi coletado no perímetro urbano, sendo feita uma composição das zonas residenciais de classe média, baixa e alta. Como pode-se observar, o percentual de matéria orgânica é bem elevado, por ser uma cidade que apresenta pouco mais de 60.000 habitantes.

4.3.1. Comparação com resíduos de outras cidades

No Quadro 16 está apresentada a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos de algumas outras cidades do Estado de Minas Gerais.

Quadro 16 – Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos de algumas cidades do Estado de Minas Gerais

Componentes	Timóteo	Manhuaçu	Ponte Nova	Viçosa	Ubá	Média
Papel e Papelão	10,77	12,28	13,46	9,36	12,67	11,70
Plástico duro	4,39	4,13	4,80	3,15	3,54	4,00
Plástico fino	2,50	1,86	1,26	1,65	1,50	1,65
Latas	3,24	2,65	2,22	2,45	3,40	2,79
Metais diversos	0,85	1,00	-	0,45	1,86	0,92
Vidros	2,92	3,96	1,96	2,50	2,50	2,64
Borracha	-	0,38	-	0,16	0,37	0,18
Madeiras	0,32	0,56	0,37	0,56	0,48	0,45
Couro	-	-	-	-	0,20	-
Trapos	0,58	1,44	0,52	0,55	0,76	0,77
Louças	-	-	0,30	0,12	0,40	0,27
Matéria Orgânica	71,16	68,89	71,04	75,30	67,50	70,70
Outros	3,27	2,85	4,07	3,75	4,82	3,93

No Quadro 17 está apresentada a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos de algumas outras cidades brasileiras.

Quadro 17 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos de algumas cidades brasileiras

COMPONENTES	PORTO ALEGRE (RS)**	SÃO PAULO (SP)**	RIO DE JANEIRO (RJ)**	BRASÍLIA (DF)**	RECIFE (PE)**	SANTO ANDRÉ (SP)*	BELO HORIZONTE (MG)***
Vidro	2,0	1,5	2,0	3,5	2,0	2,5	2,20
Metal	2,5	3,5	3,0	3,0	2,0	4,0	2,70
Plástico	2,5	12,0	13,0	2,5	8,0	12,0	6,50
Papel	25,0	14,0	27,0	26,0	15,0	7,5	13,50
Mat. Org. e outros	68,0	69,0	55,0	65,0	73,0	74,0	75,10

(*) 1992

(**) 1995

(***) 2000

A média percentual, em peso, de **matéria orgânica** contida no lixo no nosso país varia em torno de 60 a 65 %.

O **plástico** tem sofrido um aumento significativo ao longo dos anos, decorrente da sua utilização cada vez maior em embalagens de alimentos prontos e semi-prontos, em substituição ao papel/papelão.

O **papel/papelão** tem sofrido uma redução significativa, ao longo dos anos, em razão oposta à do plástico, isto é, utilização cada vez menor em embalagens. Além disso o aumento da quantidade reciclada antes da mistura com o lixo domiciliar tem contribuído para essa redução.

O **vidro**, ao longo dos anos, tem sofrido pequenas variações, considerando-se a população total de municípios. Isto porque, apesar do percentual de vidro sofrer variações apreciáveis em função do momento econômico, isso só acontece nas áreas de maior poder aquisitivo, principal consumidora de supérfluos. Nos locais de renda mais altas os percentuais de vidro são consideravelmente superiores aos verificados nos locais de rendas mais baixas.

O **metal**, tanto o ferroso quanto o não ferroso, tem mostrado uma clara tendência de redução, no lixo urbano, isto pode ser explicado, em grande parte, pela quantidade cada vez maior de reciclagem na fonte, principalmente de latas de alumínio.

Com relação ao **material inerte**, composto, basicamente, por pedras, louças cerâmicas etc., os valores tem se mantido reduzidos, com poucas variações e sem quaisquer indicações de tendências.

Outros materiais tais como folhas, madeiras, borracha, pano/trapo, couro, osso etc., vem decrescendo ao longo dos anos em algumas cidades brasileiras.

4.4. Análise da água na região do antigo “lixão” de Viçosa (MG).

As coletas d’água para análise foram realizadas nos dias 25/09/00 e 10/04/01, sendo a primeira análise feita pela “WATERCLEAN Tratamento e Análises de Águas S/C. Ltda.”, de São Paulo e a segunda análise feita pelo “Laboratório de Qualidade de Água” do Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental e pelo “Laboratório de Espectrofotometria de Absorção Atômica” do Departamento de Solos, ambos da Universidade Federal de Viçosa.

Os Quadros 18a, 18b e 18c mostram as medições no nível d’água nos piezômetros e poços da região.

Quadro 18a – Nível d’água nos piezômetros

ÁREA	PIEZÔMETRO	Ø (")	PROF. (m)	NÍVEL D'ÁGUA (m)				
				23/08/00	28/8/00	30/08/00	01/09/00	11/09/00
3	1	1	19,45	-	-	-	-	-
	2	1	12,45	-	-	-	-	10,90
2	3	1	6,45	-	-	-	-	-
	4	2	1,45	-	-	-	-	0,30
1	5	1	7,45	-	-	5,80	5,80	5,80
	6	1	5,45	4,35	-	-	4,70	4,00
	7	2	4,45	-	3,20	-	3,00	2,70

Quadro 18b – Nível d'água nos piezômetros

ÁREA	PIEZÔMETRO	Ø (")	PROF. (m)	NÍVEL D'ÁGUA (m)				
				14/09/00	20/09/00	25/09/00	20/10/00	10/04/01
3	1	1	19,45	18,70	18,65	19,00	19,00	18,80
	2	1	12,45	-	10,50	10,70	10,70	10,68
2	3	1	6,45	0,30	0,25	0,27	0,40	0,30
	4	2	1,45	-	0,10	0,40	0,52	0,35
1	5	1	7,45	-	5,80	5,90	5,87	5,81
	6	1	5,45	-	4,25	4,30	4,30	4,32
	7	2	4,45	-	2,75	2,70	2,95	2,90

Quadro 18c – Nível d'água nos poços

POÇO	DIÂMETRO (cm)	DATA	NÍVEL D'ÁGUA(m)
1	80	10/04/01	5,50
2	80	10/04/01	7,52

Os resultados analíticos das composições química e bacteriológica do água coletada nos piezômetros (P1 a P7) na área do antigo “lixão” de Viçosa (MG), fornecidos pela “WATERCLEAN Tratamento e Análises de Águas S/C. Ltda.”, de São Paulo, estão apresentados no Quadro 19.

Quadro 19 – Resultado da análise da água na região do antigo “lixão” de Viçosa (MG) coletada no dia 24/09/00

Parâmetros (*)	PIEZÔMETROS						
	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7
Amônia N	*-----	0,65	0,960	1,156	1,243	0,392	*-----
Cloretos Cl ⁻	0	0	0	0	0	0	0
Ferro II	0	0	0	0	0	0	0
Ferro III	0,143	0,093	0,115	0,135	0,131	0,035	0,153
Fósforo PO ₄	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	6,0
Nitrito N	**pres.	**pres.	**pres.	**pres.	**pres.	**pres.	**pres.
pH	7,26	6,86	6,85	6,30	6,18	7,42	7,32
Dureza Total (CaCO ₃)	76	55	75	57	76	68	61
Sulfatos	12	16	26	16	15	10	323
Sulfeto SO ₃ (tit)	1	0	0	0	0	0	5
Sulfito SO ₂ (tit)	0	0	0	0	0	0	0,7
DBO	35	15	5	5	15	40	49
DQO	86	25	0	0	18	109	115
Oxigênio consumido	16	1,2	0,1	9	0,12	19	21
Coliformes fecais	8	4	1	Ausente	Ausente	12	3
Coliformes totais	13	9	7	3	5	23	12

*interferentes ao método utilizado

**inferior ao limite de detecção do método

(*) Valores expressos em mg/L, exceto pH (adimensional) e Coliformes Totais e Fecais (Número Mais Provável por 100 mL).

Nesta primeira análise não foi considerada as águas dos poços 1 e 2 e a do rio.

Como a primeira água coletada para análise foi feita logo após a construção dos piezômetros, com certeza estes resultados são de águas transportadas, ou seja, águas utilizadas no processo de perfuração dos piezômetros e não do aquífero freático. Antes da coleta, os piezômetros deveriam ter sido desenvolvidos, ou seja, efetuado um trabalho de limpeza seguido de um teste de vazão.

Com isso, os resultados apresentados não foram considerados para efeito de contaminação, apesar dos parâmetros mostrarem uma qualidade de água compatível com as águas do lençol freático (passíveis de contaminação bacteriológica). Apesar do depósito de lixo estar desativado, os valores encontrados são baixos, não sendo detectado qualquer problema de contaminação no aquífero subterrâneo.

Com base nos dados apresentados, foi feita, então, uma segunda coleta d'água. Os resultados analíticos das composições química e bacteriológica da água coletada nos piezômetros (P1 a P7), no Rio Turvo Sujo e nos Poços (1 e 2) na área do antigo "lixão" de Viçosa (MG), fornecidos pelo "Laboratório de Qualidade de Água" do Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental e pelo "Laboratório de Espectrofotometria de Absorção Atômica" do Departamento de Solos, ambos da Universidade Federal de Viçosa, estão apresentados nos Quadro 20.

Quadro 20 – Resultado da análise da água na região do antigo “lixão” de Viçosa (MG) coletada no dia 10/04/01

PARÂMETROS (*)	PIEZÔMETROS							RIO	POÇO	
	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	TURVO	1	2
Oxigênio Dissolvido	6,3	6,6	5,5	4,7	7,1	7,1	2,1	1,5	-	-
DBO	40,5	65,3	23,1	44,5	27,4	39,2	317,6	48,2	9,6	18,0
DQO	97,2	97,2	38,9	116,6	77,8	77,8	388,8	78,4	29,1	48,6
N _{total}	35	35	21	28	35	21	133	21	ND	17,5
Sólidos Totais	1683,6	721,7	5,7	393,5	1578,3	4811,6	1940,6	14,3	-	-
Alcalinidade	135	80	110	40	85	140	2290	215	-	-
Zinco	0,033	0,007	0,032	0,011	0,002	0,032	0,038	0,002	-	-
Cádmio	0,003	0,005	0	0,006	0,003	0,003	0,008	0,001	-	-
Cobre	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
Chumbo	0	0,003	0	0,031	0	0	0,054	0,027	-	-
Coliformes Totais	25,9E3	8,2E3	< 1	4,1E3	< 1	1E3	18,3E3	235,9E3	2	26,2
Coliformes Fecais	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1E3	42,8E3	2	< 1

(*) Valores expressos em mg/L, exceto Coliformes Totais e Fecais (Número Mais Provável por 100 mL).

ND = Não detectado.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 20, de 18 de junho de 1986, item Águas Doces, Classe Especial e Classe 1, artigo 3º e 4º, conclui-se que:

- Os piezômetros (P1, P2, P4 a P7), apresentaram contaminação por cádmio (limite = 0,001 mg/L) e os piezômetros (P4 e P7) por chumbo (limite = 0,03 mg/L). Estes 2 elementos não são observáveis no substrato do solo brasileiro em geral e, portanto, deveriam ser verificados em outras regiões mais próximas ao depósito de lixo. Se for confirmado a não existência desses elementos nos solos próximo à região, com certeza eles são provenientes do lixo depositado, principalmente em função de utilização pela população de pilhas de níquel e cádmio e baterias chumbo/ácido, baterias de veículos, formando o sulfato de chumbo, que é solúvel em água.

- Avaliando-se os resultados apresentados nos poços 1 e 2, pode-se verificar que as amostras de água estão entre as que apresentaram menor contaminação.

- O poço 2 apresentou, entretanto, maiores concentrações de DBO, DQO e N_{total}. Por estar este poço em área de pequena influência do lixão e do

Rio Turvo, acredita-se que a contaminação das águas seja local (fossas, disposição de dejetos animais no solo), entrada de contaminantes via superfície ou, ainda, falta de limpeza do poço.

- Os piezômetros P1 a P6, apesar de apresentarem valores de DBO e DQO acima do normal, não apresentam outros parâmetros que evidenciem preocupante contaminação.

- As amostras com menor quantidade de oxigênio, P7 e Rio Turvo, são as que apresentam maiores valores de DBO e DQO, no caso do P7, e número de bactérias do grupo coliforme. Águas mais ricas em material orgânico apresentam menores concentrações de oxigênio dissolvido.

- Os altos valores encontrados para DBO, DQO, N_{total} , alcalinidade, chumbo e coliformes fecais no P7 indicam ser este o piezômetro cujas amostras de água apresentaram-se mais contaminadas. Esta contaminação pode ser decorrente do fato de ser este o piezômetro posicionado na mais baixa cota. Por estar muito próximo do Rio Turvo, reconhecidamente poluído por esgoto doméstico, pode apresentar contaminação por influência dessas águas superficiais. A presença de tão alto número de coliformes fecais, que não foi observado em nenhum outro piezômetro, é um comprovante disso. Entretanto, como nesta área houve deposição de lixo doméstico, a contaminação pode, também, ser proveniente da lixiviação nas pilhas de resíduos.

- Os sólidos totais com certeza estão fora dos limites devido ao não desenvolvimento e limpeza dos piezômetros, o que acarretou durante a coleta das amostras um arraste de materiais particulados.

4.5. Análise do solo na região do antigo “lixão” de Viçosa (MG).

Os resultados das análises físicas e químicas das amostras de solo retiradas na área do antigo “lixão” de Viçosa (MG), fornecidos pelo “Laboratório de Qualidade de Água” do Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal de Viçosa, estão apresentados no Quadro 21.

Quadro 21 – Resultado da análise das amostras de solo da área do antigo “lixão” de Viçosa (MG)

Amostra	Prof. (m)	N _{total} *(g/kg)	P _{disp.} **(mg/kg)	K _{troc.} **(mg/kg)	Na _{troc.} **(mg/kg)
Solo + Lixo	5,50	32,1	31,2	562,3	259,9
Solo + Lixo	5,50	44,3	72,4	556,6	258,4
Solo	3,00	5,5	13,4	9,3	10,3
Solo	7,00	0,0	12,4	20,6	0,0

*N_{total} = N_{orgânico} + amoniacal + nitrato

** Extrator Mehlich.

MATOS (1995) apresentou as análises químicas de amostras de solo, PVc (Podzólico Vermelho-Amarelo câmbico) e o LVa (Latosolo Vermelho-Amarelo álico), comuns nas encostas da região, e que estão resumidas no Quadro 22.

Quadro 22 – Análises químicas das amostras de solo

Solo/Horizonte	N _{total} (g/kg)	K _{troc.} (mg/kg)	Na _{troc.} (mg/kg)
PVc	1,21	35,1	35,1
LVa	1,51	7,8	4,6

Observando o quadro acima e comparando com os dados coletados, pode-se concluir que as amostras de solo com lixo nas camadas de 5,50 m, nos furos de sondagem FS-4 e FS-5, apresentaram contaminação pelo lixo depositado sobre o solo. As concentrações de N_{total}, K_{trocável} e Na_{trocável} estão muito acima das encontradas por este autor.

Nas camadas de 3,00 m e 7,00 m de solo, os problemas de contaminação foram, relativamente, pequenos, havendo entretanto contaminação importante com nitrogênio.

Segundo LOPES (1984), para solos de “cerrado”, o P_{disp} está na faixa de 0,1 a 16,5 mg/kg e de N_{total} de 0,75 a 1,5 g/kg, comparando com estes valores, somente nas camadas onde houve a incorporação de lixo é que foi encontrado um aumento na concentração desse elemento.

4.6. Curvas de Eluição

De posse do resultado das análises feita por espectrofotometria de absorção atômica, realizadas no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, foram obtidas as curvas de eluição dos metais pesados zinco, cádmio, cobre e chumbo nos solos “Argila 3,00 m” (amostra 2 e 3) e “Argila 7,00 m” (amostra 4, 5 e 6). Os ensaios realizados com a amostra 1 do solo “Argila 3,00 m” foram desprezados por terem se diferenciado muito dos outros ensaios, possivelmente em função de uma amostragem indevida.

Nas curvas de eluição do zinco, cádmio, cobre e chumbo dos solos “Argila 3,00 m” e “Argila 7,00 m”, foram obtidos os valores do fator de retardamento (R_d) como sendo o volume de poros para $C/C_0 = 0,5$ e o coeficiente de dispersão-difusão (D_h) como sendo a inclinação da curva no ponto $C/C_0 = 0,5$, conforme GERMANO, 2001. No Quadro 23 está apresentado o resumo dos resultados obtidos.

Quadro 23 – Parâmetro de transporte dos elementos

ELEMENTO	SOLO		V (m/s)	D _h (m ² /s)	R _d
ZINCO	Argila 3,00 m	Amostra 2	4,70E-05	3,13E-07	1,90
		Amostra 3	5,70E-05	5,62E-07	1,80
	Argila 7,00 m	Amostra 4	5,30E-06	5,26E-06	2,20
		Amostra 5	4,30E-06	9,17E-08	1,70
		Amostra 6	4,80E-06	1,33E-08	1,85
CÁDMIO	Argila 3,00 m	Amostra 2	4,70E-05	1,37E-07	2,00
		Amostra 3	5,70E-05	8,12E-07	2,00
	Argila 7,00 m	Amostra 4	5,30E-06	3,10E-06	1,90
		Amostra 5	4,30E-06	1,67E-08	1,90
		Amostra 6	4,80E-06	1,67E-09	1,95
COBRE	Argila 3,00 m	Amostra 2	4,70E-05	1,93E-06	4,00
		Amostra 3	5,70E-05	2,02E-06	3,50
	Argila 7,00 m	Amostra 4	5,30E-06	1,96E-06	3,50
		Amostra 5	4,30E-06	2,33E-08	3,40
		Amostra 6	4,80E-06	2,67E-08	2,50
CHUMBO	Argila 3,00 m	Amostra 2	4,70E-05	4,42E-07	5,50
		Amostra 3	5,70E-05	8,55E-07	4,50
	Argila 7,00 m	Amostra 4	5,30E-06	5,92E-07	5,00
		Amostra 5	4,30E-06	6,17E-08	4,10
		Amostra 6	4,80E-06	4,67E-08	4,50

Nas Figuras 24 a 43 estão apresentadas as curvas de eluição do zinco, cádmio, cobre e chumbo obtidas no laboratório e calculadas pela teoria de transporte de contaminantes com os parâmetros apresentados no Quadro 23.

(i) Curvas de Eluição do Zinco

Pode-se verificar, analisando-se as Figuras 24 a 28, que a mobilidade do zinco é relativamente baixa, em razão da obtenção de um fator de retardamento próximo a 2,0, o que é um indicativo de pequena interação solo-soluto.

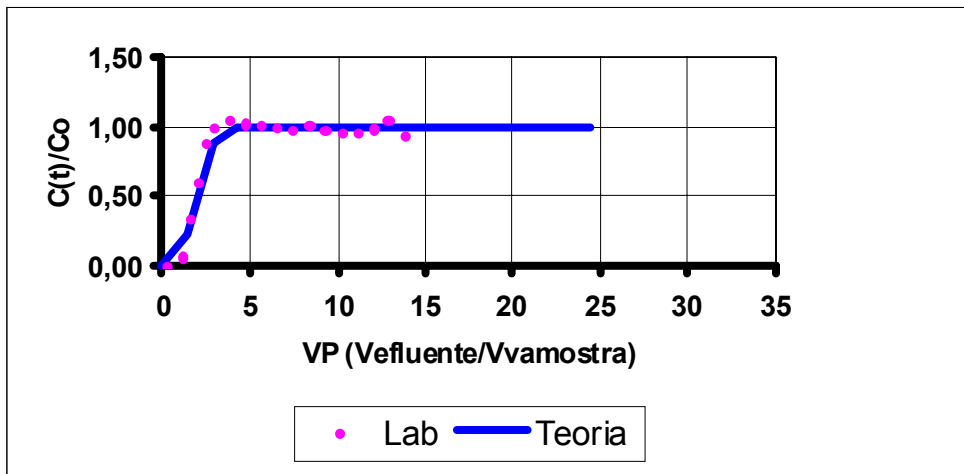


Figura 24 – Comparação entre curvas de eluição do zinco – “Argila 3,00 m” – Amostra 2.

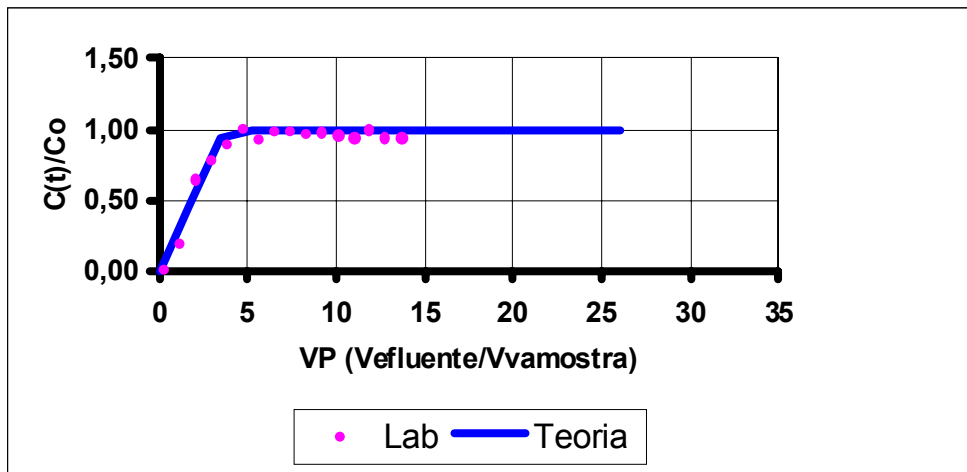


Figura 25 – Comparação entre curvas de eluição do zinco – “Argila 3,00 m” – Amostra 3.

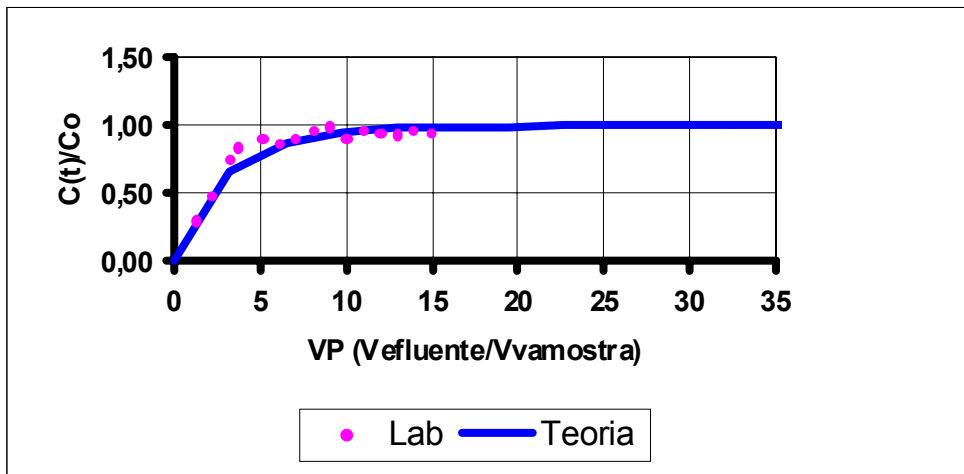


Figura 26 – Comparação entre curvas de eluição do zinco – “Argila 7,00 m” – Amostra 4.

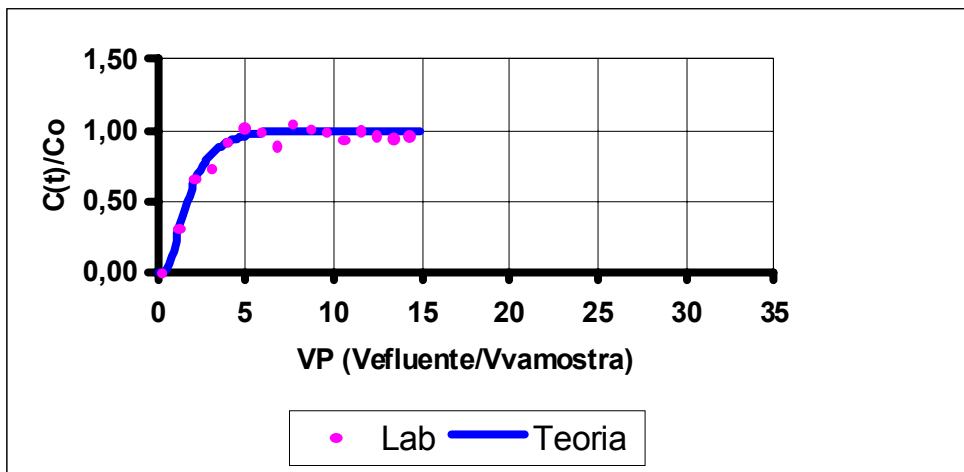


Figura 27 – Comparação entre curvas de eluição do zinco – “Argila 7,00 m” – Amostra 5.

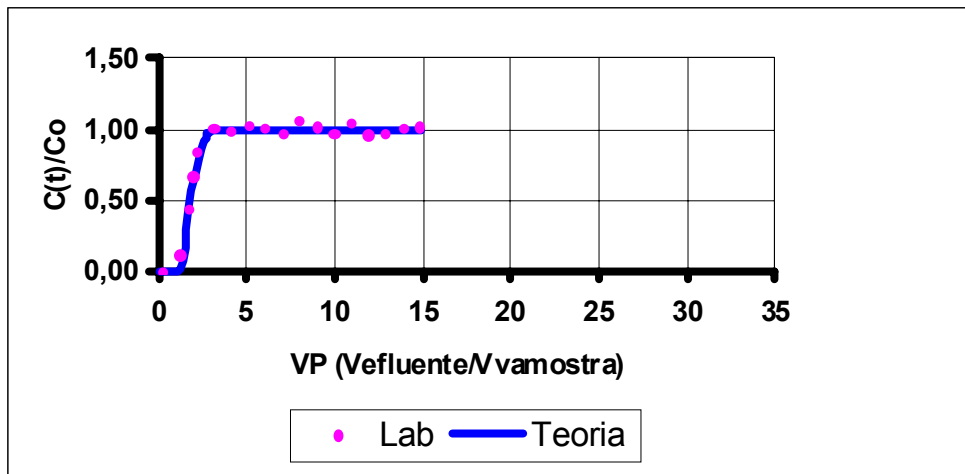


Figura 28 – Comparação entre curvas de eluição do zinco – “Argila 7,00 m” – Amostra 6.

(ii) Curvas de Eluição do Cádmi

O comportamento do cádmio (Figuras 29 a 33) foi muito semelhante ao observado para o zinco, com fatores de retardamento próximo a 2,0.

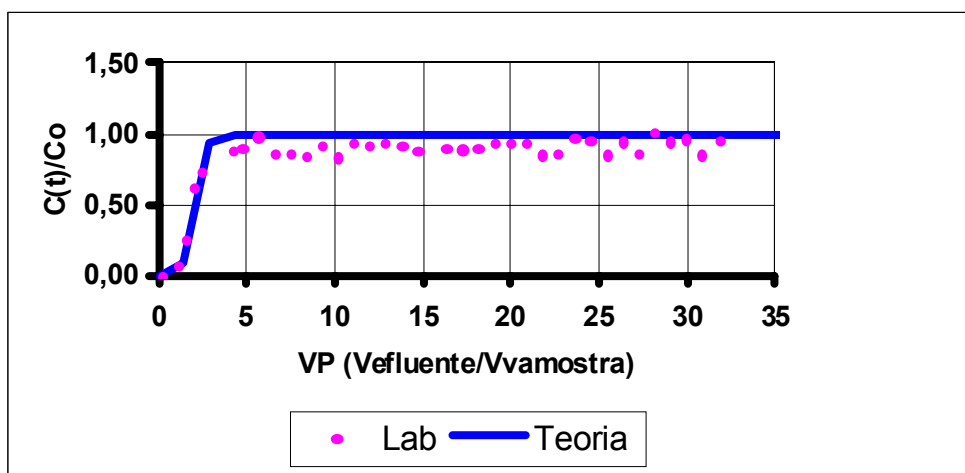


Figura 29 – Comparação entre curvas de eluição do cádmio – “Argila 3,00 m” – Amostra 2.

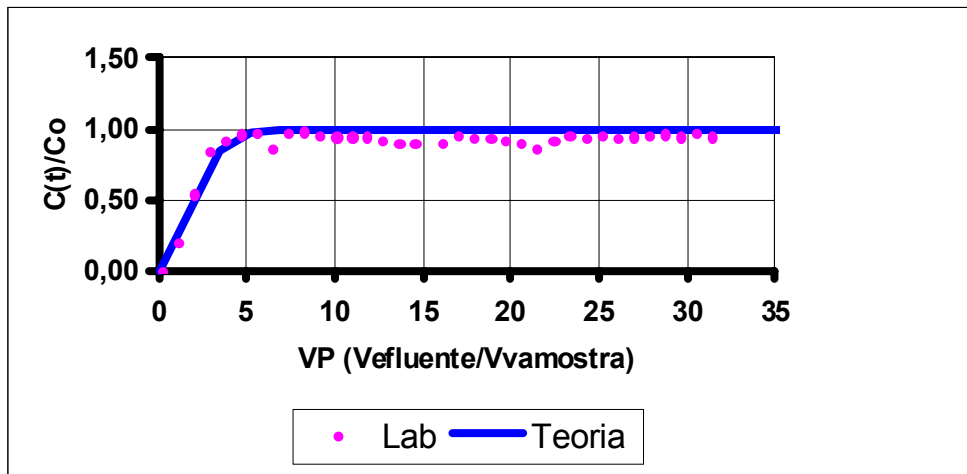


Figura 30 – Comparação entre curvas de eluição do cádmio – “Argila 3,00 m” – Amostra 3.

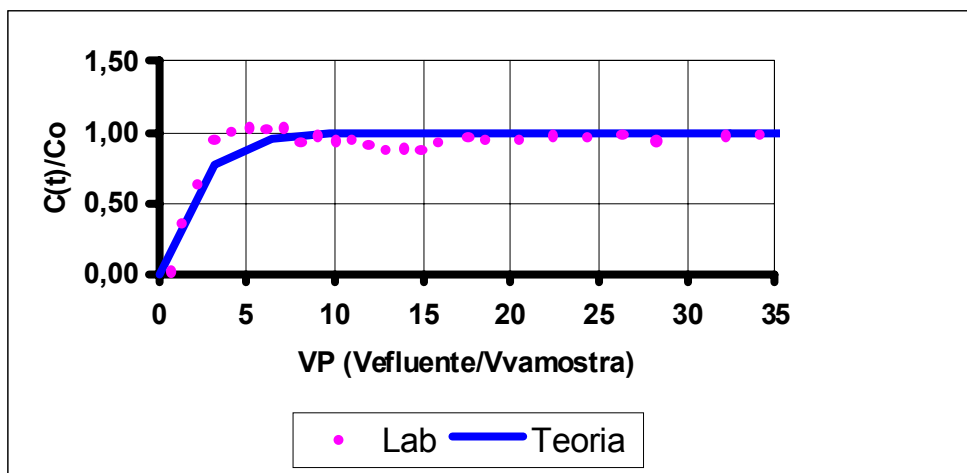


Figura 31 – Comparação entre curvas de eluição do cádmio – “Argila 7,00 m” – Amostra 4.

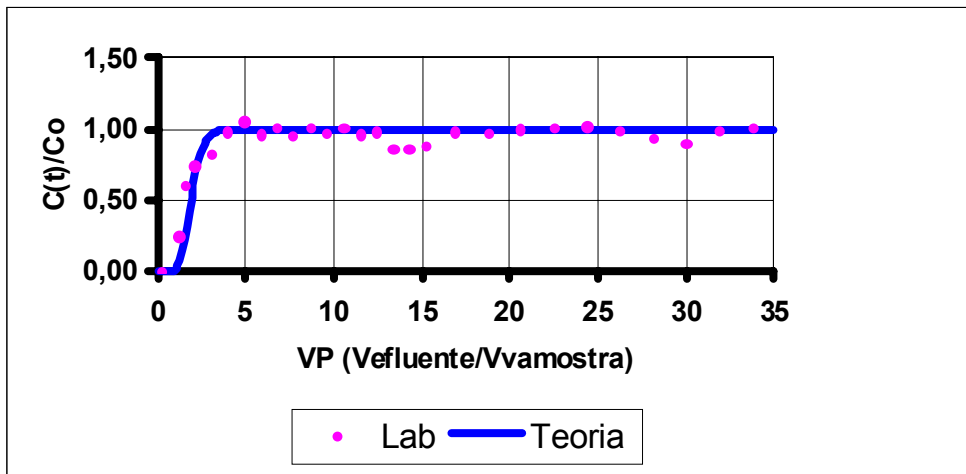


Figura 32 – Comparação entre curvas de eluição do cádmio – “Argila 7,00 m” – Amostra 5.

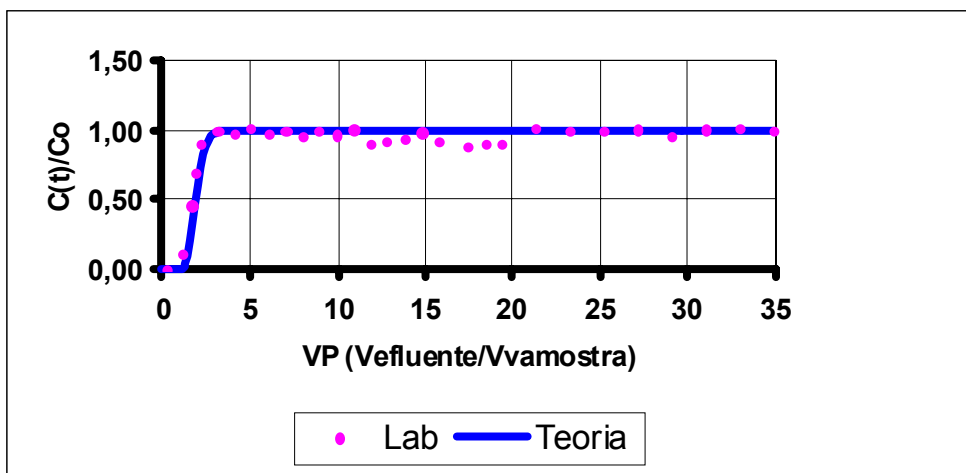


Figura 33 – Comparação entre curvas de eluição do cádmio – “Argila 7,00 m” – Amostra 6.

(iii) Curva de Eluição do Cobre

O comportamento da curva de eluição do cobre (Figuras 34 a 38) evidenciam uma menor mobilidade desse metal que as observadas para o zinco e cádmio. Isso deve-se a uma maior interação deste metal percolado com os solos estudados.

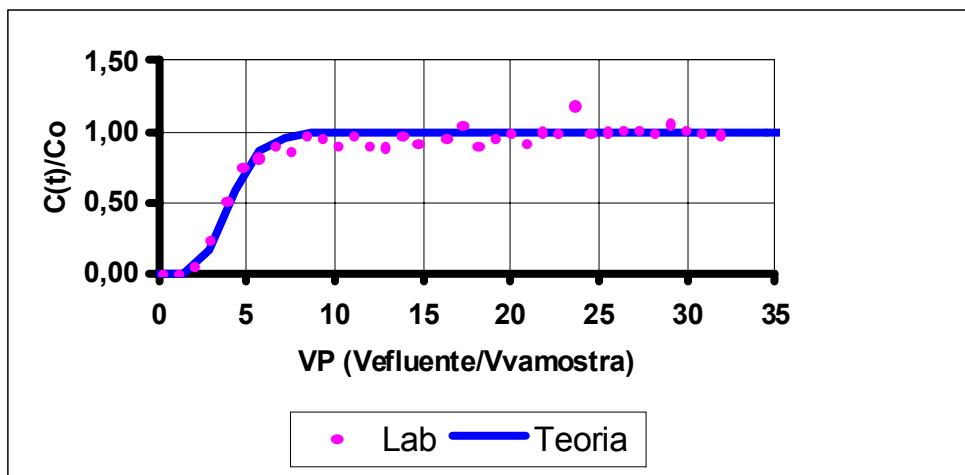


Figura 34 – Comparação entre curvas de eluição do cobre – “Argila 3,00 m” – Amostra 2.

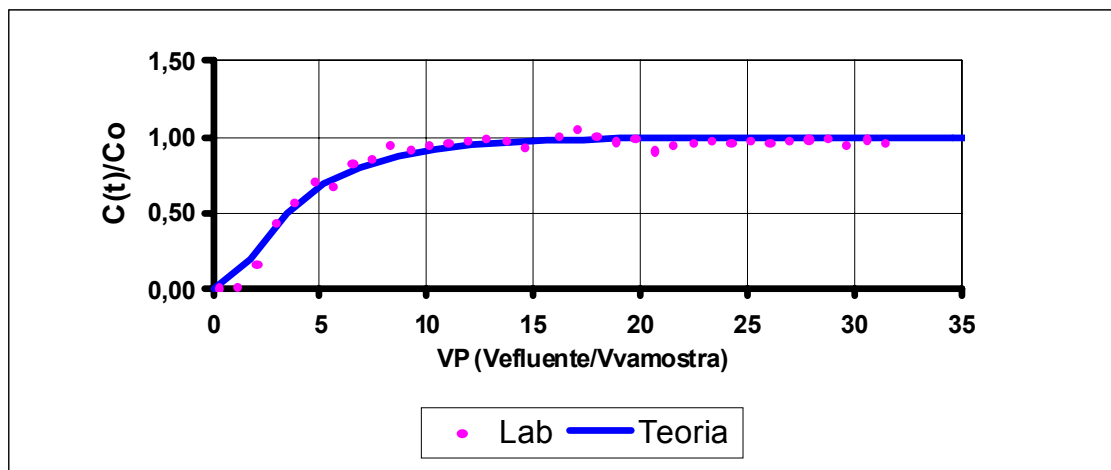


Figura 35 – Comparação entre curvas de eluição do cobre – “Argila 3,00 m” – Amostra 3.

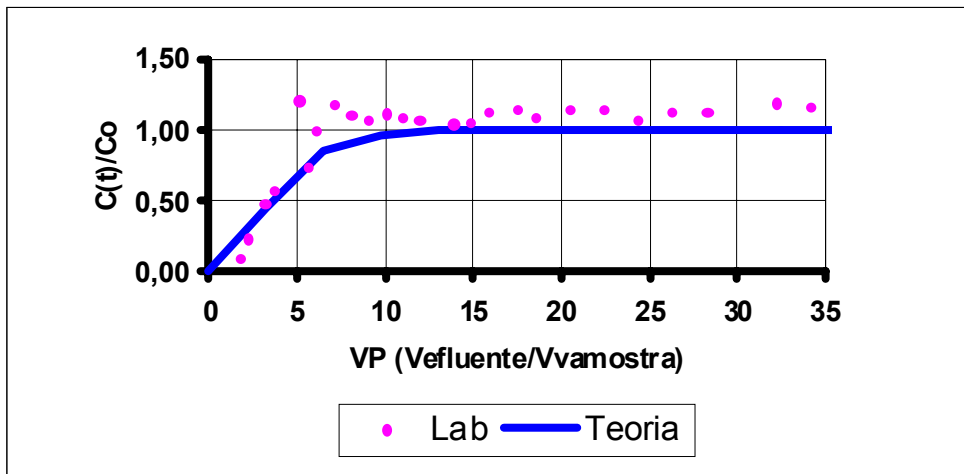


Figura 36 – Comparação entre curvas de eluição do cobre – “Argila 7,00 m “ – Amostra 4.

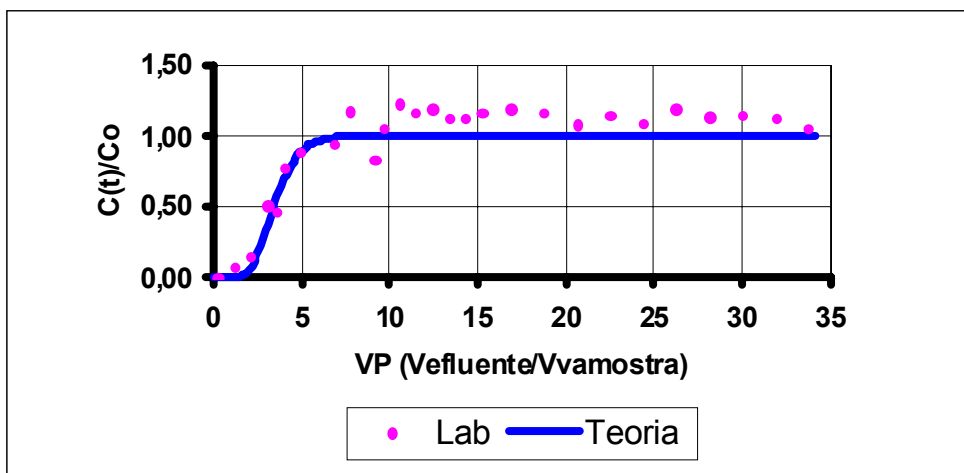


Figura 37 – Comparação entre curvas de eluição do cobre – “Argila 7,00 m” – Amostra 5.

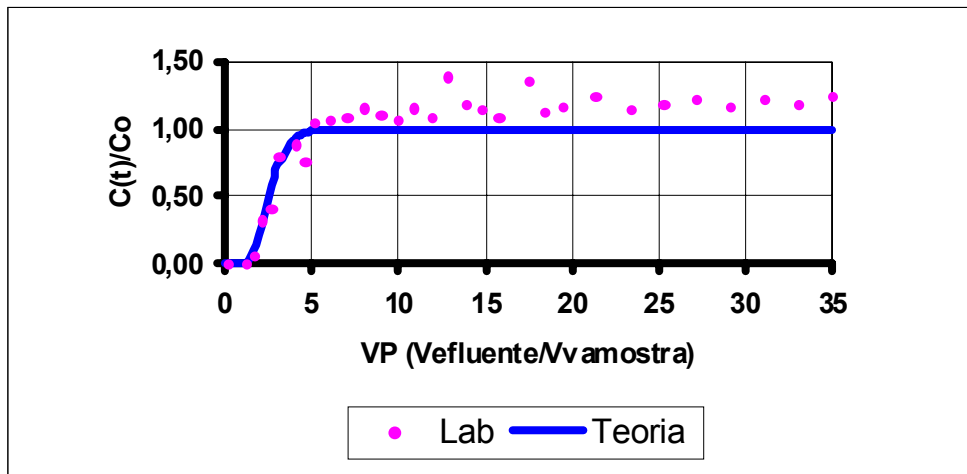


Figura 38 – Comparação entre curvas de eluição do cobre – “Argila 7,00 m” – Amostra 6.

(iv) Curva de Eluição do Chumbo

As curvas de eluição do chumbo (Figuras 39 a 43) foram as que apresentaram menor dispersão entre os pontos obtidos experimentalmente.

Estas curvas evidenciaram a mais baixa mobilidade dentre os metais estudados, originando um fator de retardamento próximo a 5,0.

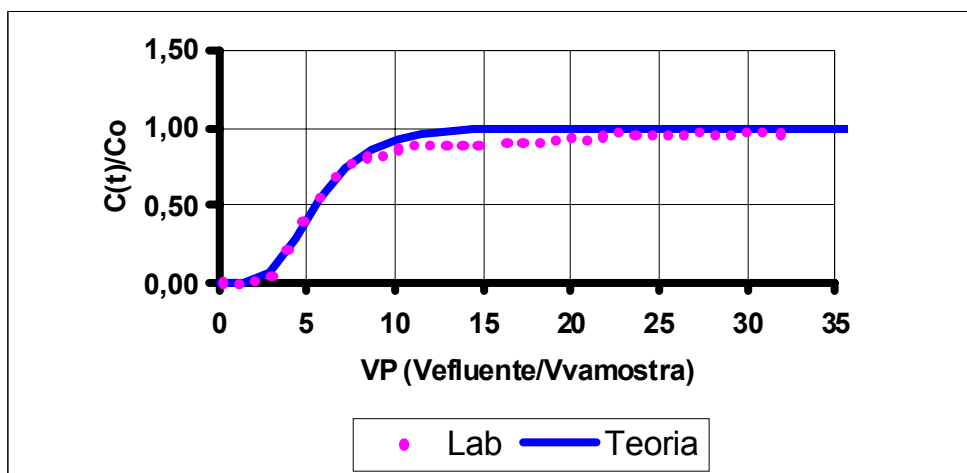


Figura 39 – Comparação entre curvas de eluição do chumbo – “Argila 3,00 m” – Amostra 2.

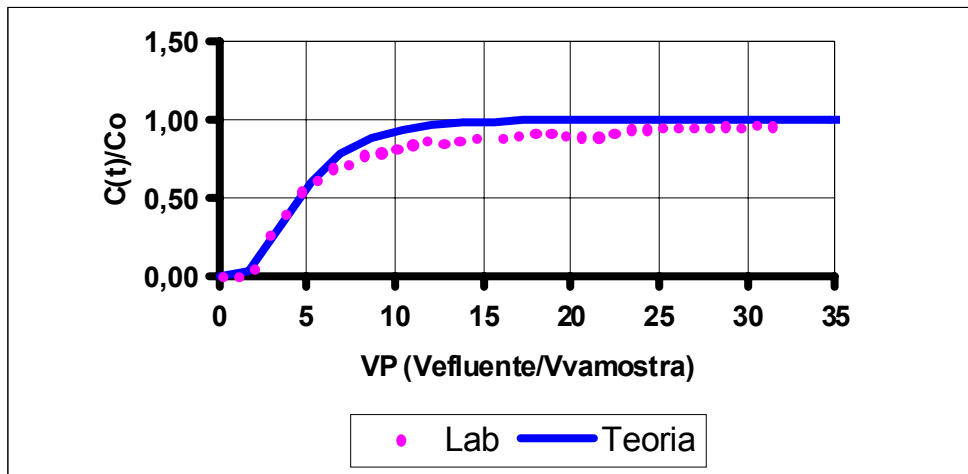


Figura 40 – Comparação entre curvas de eluição do chumbo – “Argila 3,00 m” – Amostra 3.

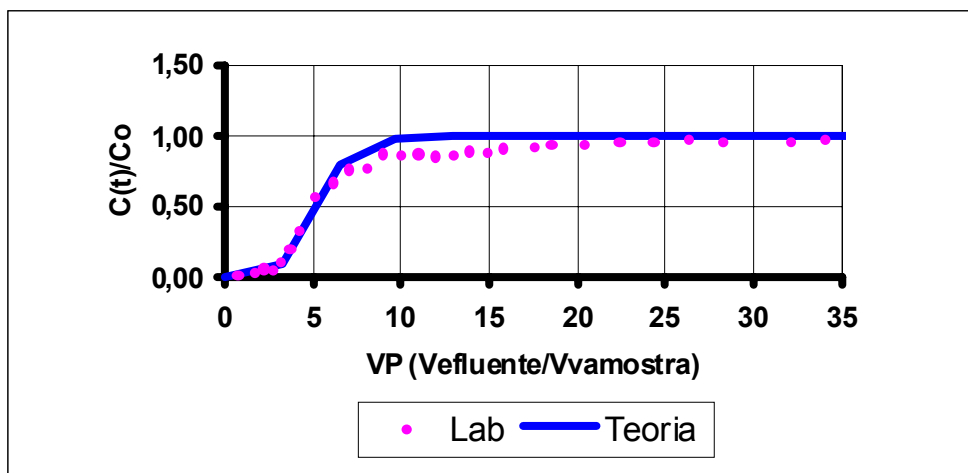


Figura 41 – Comparação entre curvas de eluição do chumbo – “Argila 7,00 m” – Amostra 4.

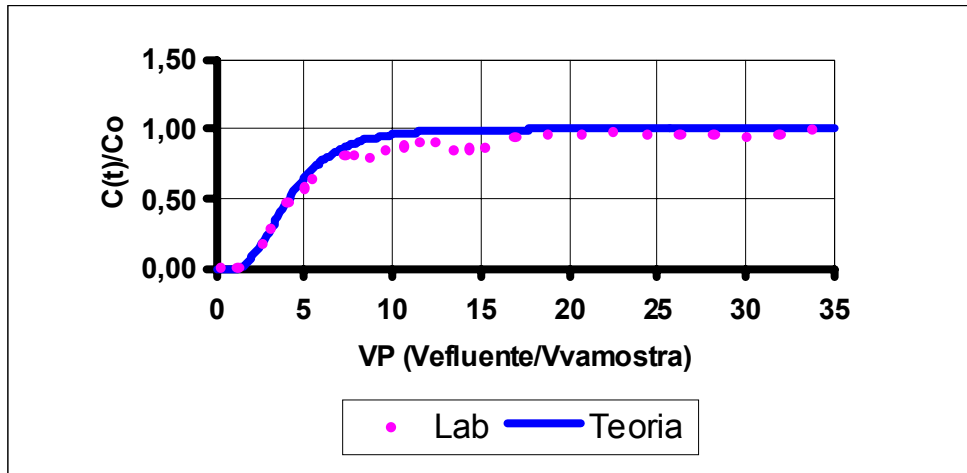


Figura 42 – Comparação entre curvas de eluição do chumbo – “Argila 7,00 m” – Amostra 5.

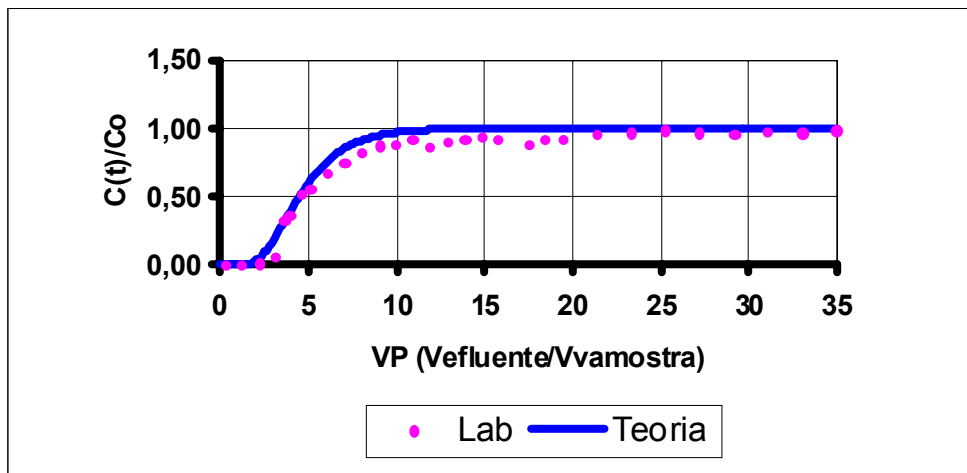


Figura 43 – Comparação entre curvas de eluição do chumbo – “Argila 7,00 m” – Amostra 6.

O coeficiente de dispersão-difusão (D_h) é governado por 2 mecanismos: a dispersão mecânica (D_m) e a difusão molecular (D_e), ou seja:

$$D_h = D_m + D_e \dots \dots \dots (4.1)$$

Como a dispersão mecânica resulta de variações na magnitude da velocidade de percolação (V), o coeficiente de dispersão mecânica (D_m) é admitido frequentemente como uma função desta velocidade:

$$D_m = \alpha_L * V \quad (4.2)$$

Onde α_L é a dispersividade longitudinal.

Substituindo a expressão (4.2) na expressão (4.1) obtêm-se:

$$D_h = \alpha_L * V + D_e \quad (4.3)$$

Como os ensaios realizados tinham velocidades de percolação (V) diferentes, foi possível por meio de um ajuste linear entre os valores de V e D_h , Quadro 23, obter valores de α_L e D_e . No Quadro 24 estão apresentados os valores de α_L e D_e assim obtidos. Quando da utilização de somente 2 pontos ou de velocidades muito próximas, alguns valores de α_L e D_e não apresentaram sentido físico (apresentaram-se negativos) e, por este motivo, este procedimento não pode ser utilizado na determinação de α_L e D_e nas análises numéricas. O procedimento utilizado para a obtenção destes parâmetros será apresentado no capítulo 5.

Quadro 24 – Parâmetros de transporte de dispersividade longitudinal e difusão efetivo

Solo	Zinco		Cádmio		Cobre		Chumbo	
	α_L (m)	D_e (m ² /s)	α_L (m)	D_e (m ² /s)	α_L (m)	D_e (m ² /s)	α_L (m)	D_e (m ² /s)
Argila 3,00 m	2,59E-2	-0,90E-6	7,03E-2	-3,17E-6	9,38E-3	1,49E-6	4,31E-2	1,58E-6
Argila 7,00 m	-17,80E-2	0,87E-6	-1,14E-10	0,07E-6	7,58E-3	-0,01E-6	-3,41E-2	0,21E-6

5. MODELAGEM NUMÉRICA

A análise numérica aplicada ao escoamento de água subterrânea e do transporte de poluente tem se constituído, ultimamente, em uma ferramenta de grande utilidade na questão na quantificação e qualificação dos recursos hídricos subterrâneos.

A análise numérica em questão foi feita com uso dos programas SEEP/W e CTRAN/W, que é um software da GEO-SLOPE International Ltda., que operam dentro do ambiente Windows, usando o método dos elementos finitos para simular o fluxo e o transporte de contaminantes em materiais porosos.

Inicialmente, foi feita a discretização em elementos finitos do perfil longitudinal A – A' apresentado na Figura 9. Foram utilizados na malha de elementos finitos, elementos quadrilaterais de 8 nós, para análise do fluxo usando-se o programa SEEP/W. Na Figura 44 está mostrada a secção crítica discretizada em elementos finitos com os materiais e as condições de contorno empregadas.

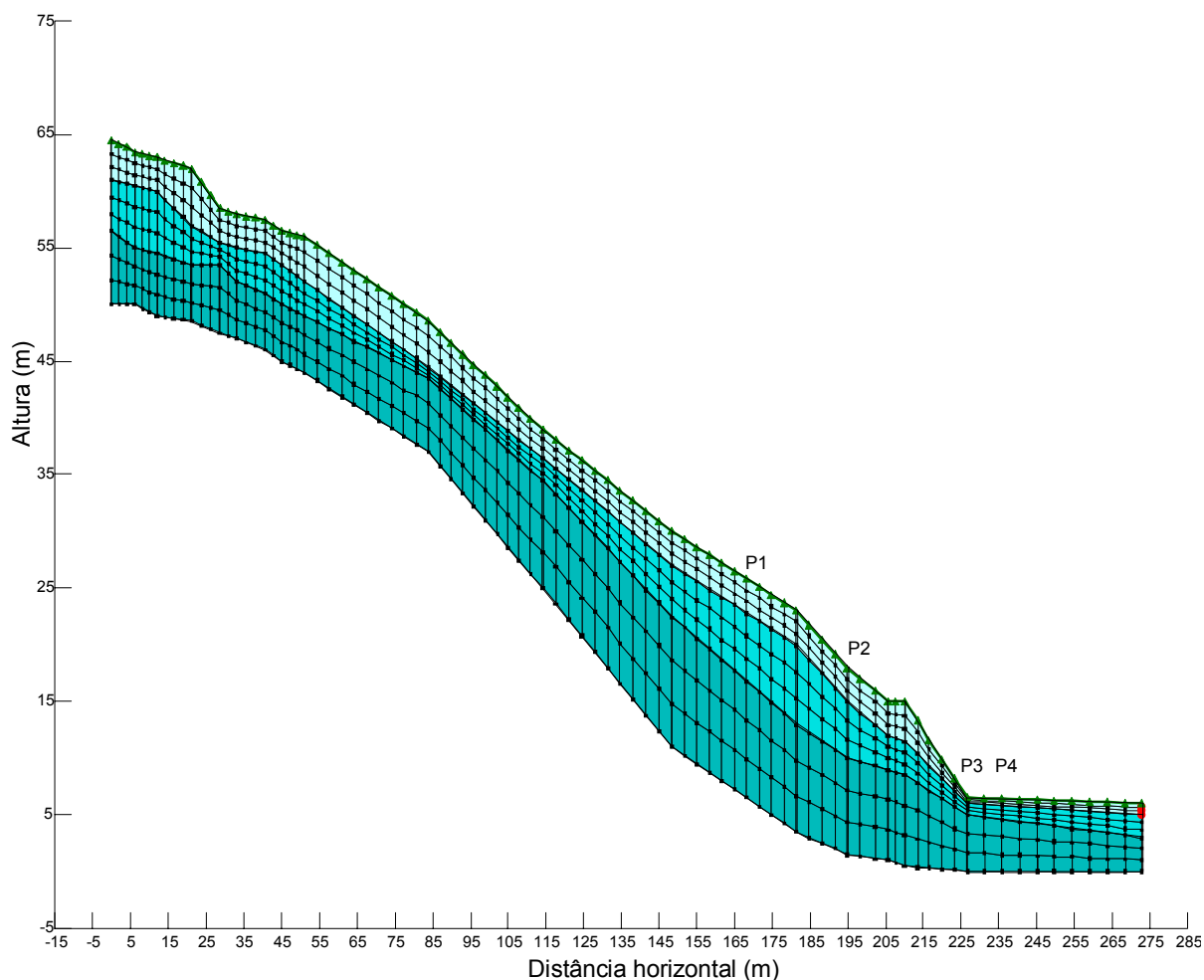


Figura 44 – Perfil crítico discretizado em elementos finitos.

O estudo considerou a precipitação média da região de Viçosa (MG) fornecidos pela Estação Climatológica de Viçosa que foram apresentados no Quadro 5 e na Figura 7.

Com base nos dados climatológicos, AZEVEDO (2001) calculou o balanço hídrico da região. De acordo com este autor, considerando a percolação somente nos meses de novembro, dezembro, janeiro e março, encontrou-se o total de 197,10 mm/ano de recarga, ou seja, $6,25E-09$ m/s. A este valor acrescentou-se 10% devido à formação de chorume, obtendo-se o valor de $6,875E-09$ m/s de infiltração.

Este valor de infiltração foi fornecido como condição de contorno em toda a superfície do talude em estudo (Figura 44). Além disso, considerou-se a carga total conhecida em 3 pontos do contorno direito da malha correspondentes ao pequeno curso d'água existente na região.

Os parâmetros geotécnicos de condutividade hidráulica (m/s) e teor de água volumétrico foram determinados em laboratório para a “Argila 3,00 m” e “Argila 7,00 m”. Considerando o meio saturado ($S = 1$), o teor de água volumétrico (θ) é igual a porosidade (n).

Para a “Areia” como não se dispunha de resultados experimentais, arbitrou-se valores de condutividade hidráulica e porosidade de acordo com a bibliografia consultada.

Os gráficos das funções de condutividade hidráulica e de teor de água volumétrico versus pressão utilizados estão apresentados nas Figuras 45 a 50. Estas funções foram arbitradas a partir do banco de dados existente no programa SEEP/W.

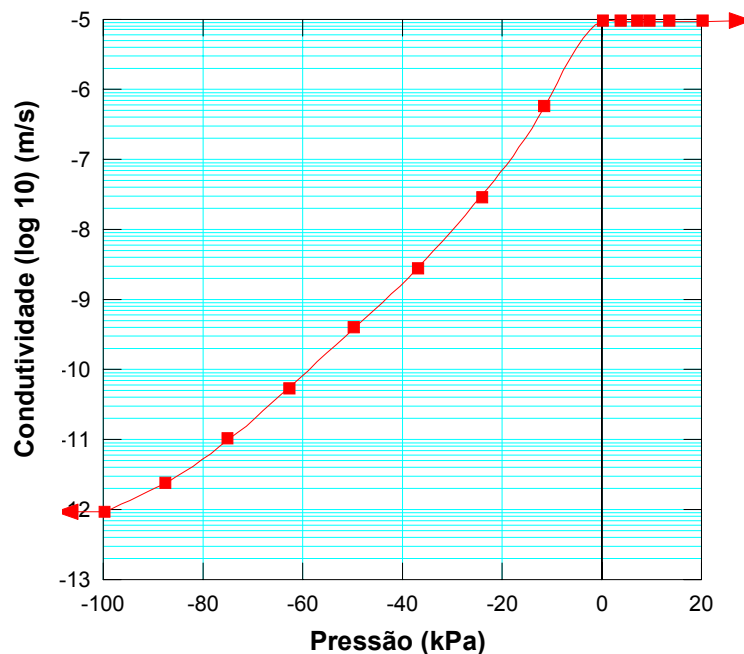


Figura 45 – Função de condutividade (m/s) versus a pressão (kPa) para a “Argila 3,00 m”.

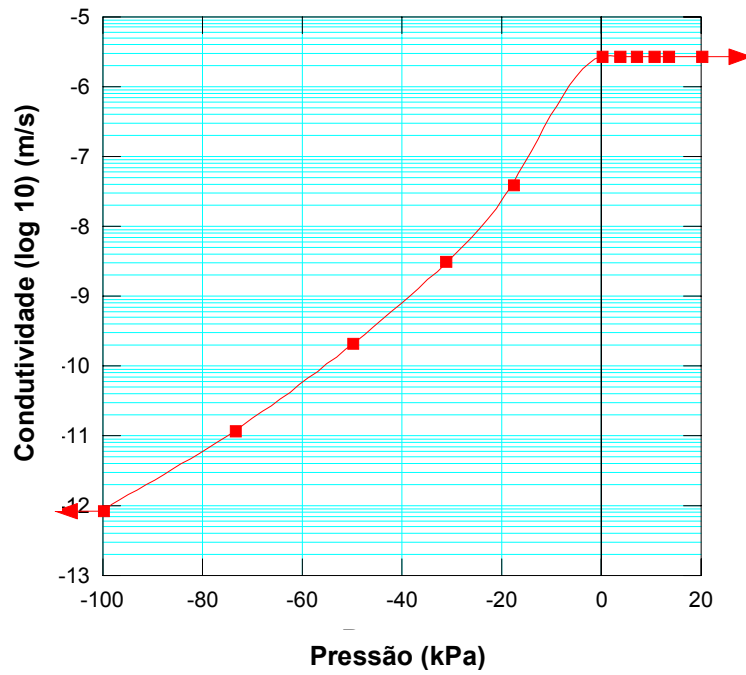


Figura 46 – Função de condutividade (m/s) versus a pressão (kPa) para a “Argila 7,00 m”.

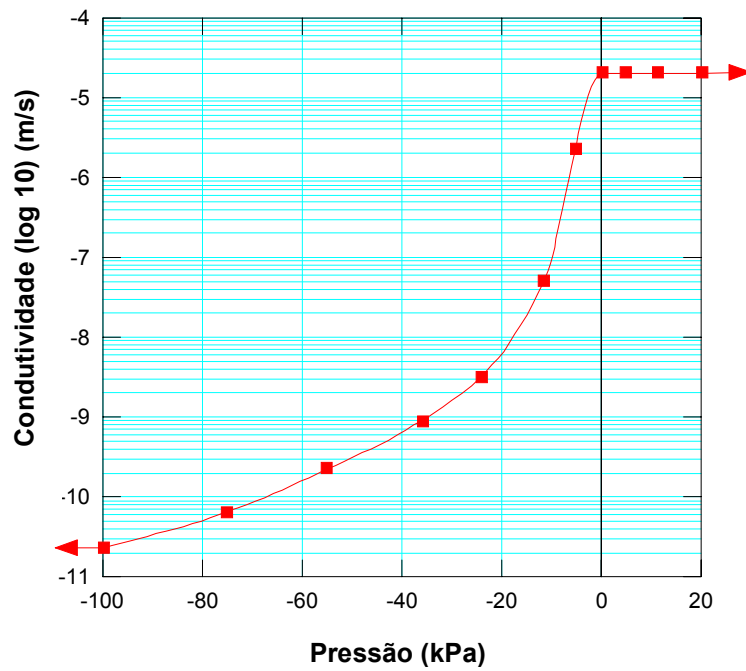


Figura 47 – Função de condutividade (m/s) versus a pressão (kPa) para a “Areia”.

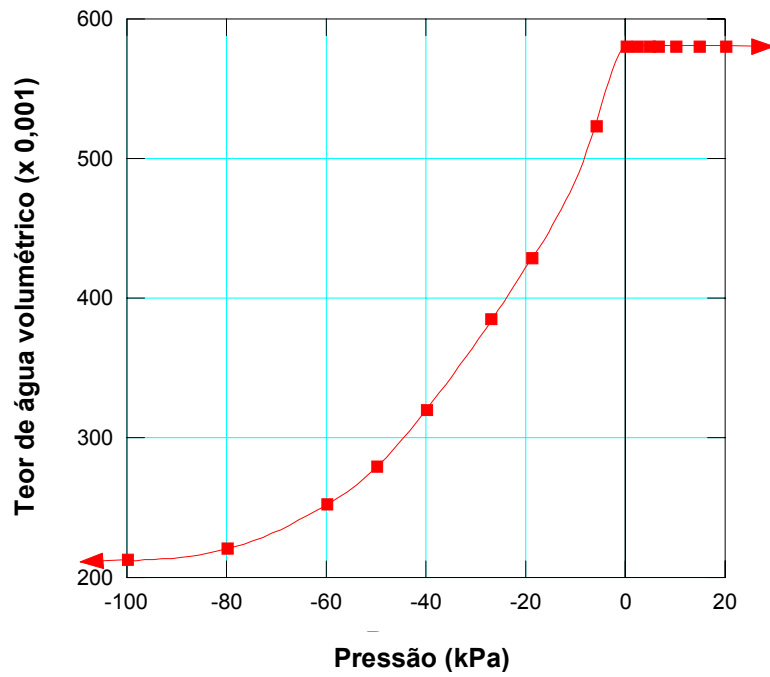


Figura 48 – Função de teor de água volumétrica versus a pressão (kPa) para a “Argila 3,00 m”.

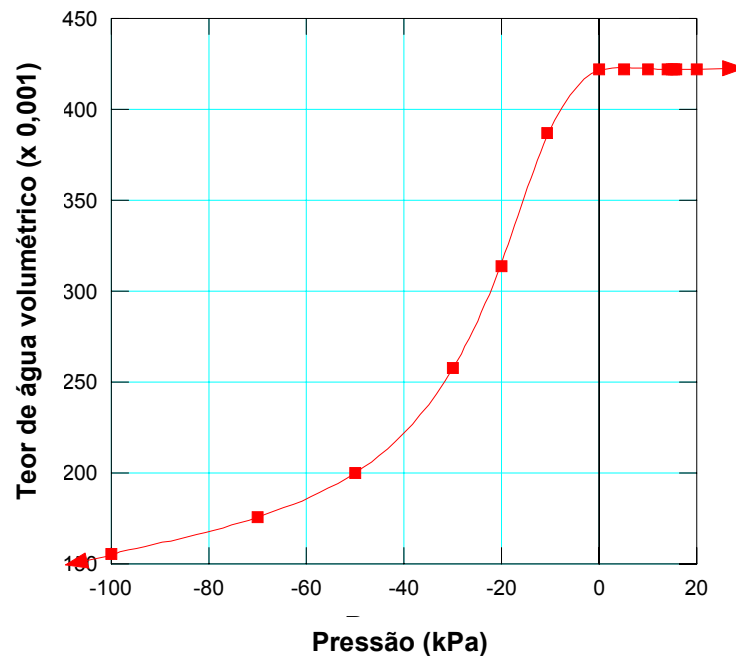


Figura 49 – Função de teor de água volumétrica versus a pressão (kPa) para a “Argila 7,00 m”.

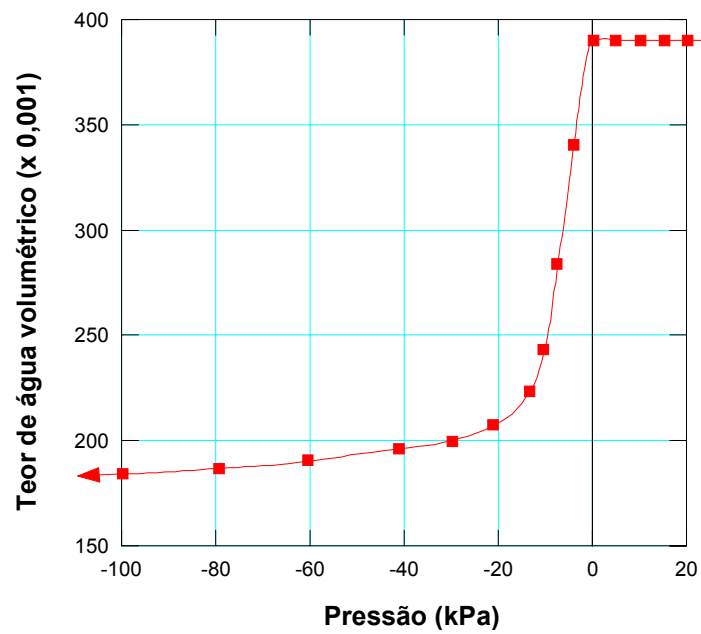


Figura 50 – Função de teor de água volumétrico versus a pressão (kPa) para a “Areia”.

A Figura 51 mostra as isocurvas de carga total obtida com o estudo.

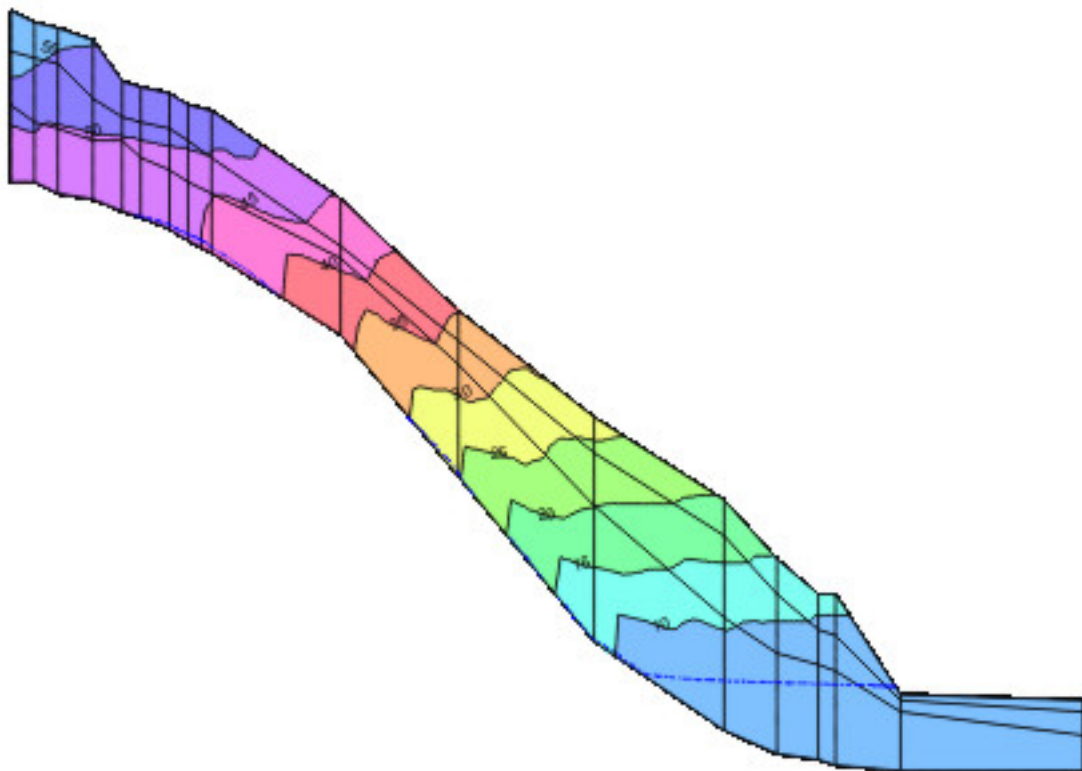


Figura 51 – Isocurvas de carga total (m).

Nas Figuras 52, 53 e 54 estão mostradas as isocurvas de carga de pressão, de teor de água volumétrico e da velocidade de percolação em XY, gerados pelo programa em função dos dados obtidos.

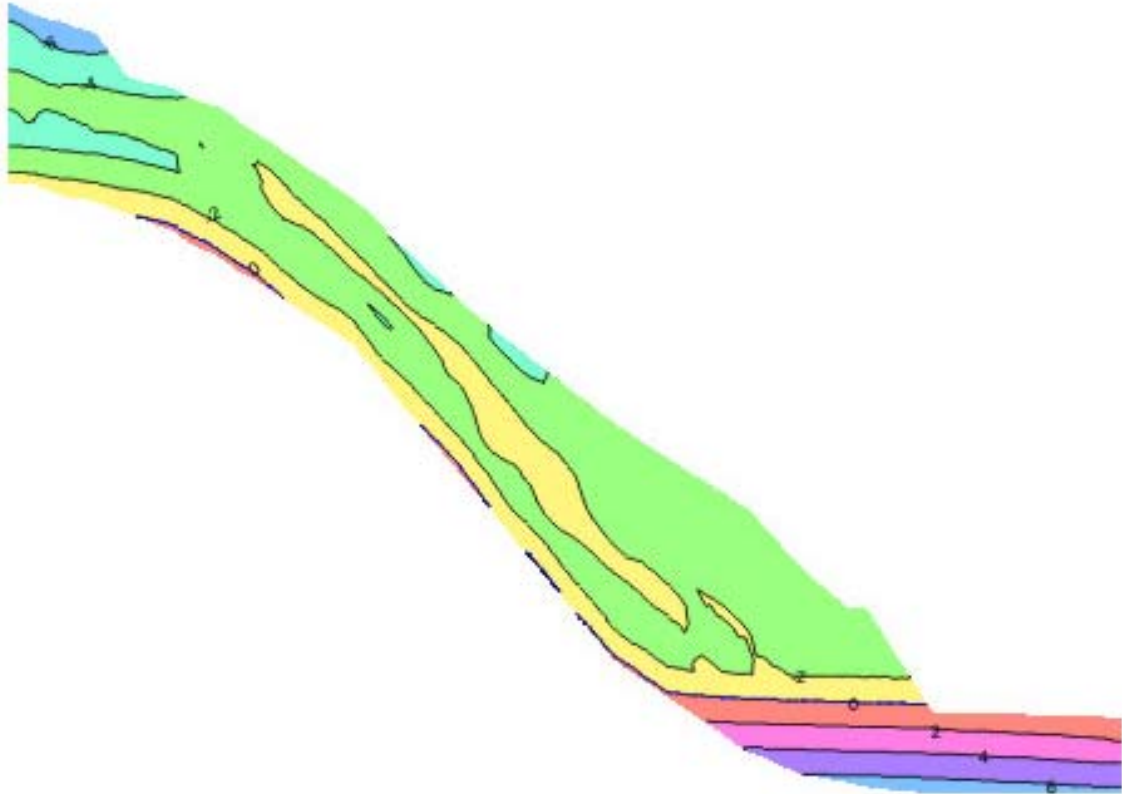


Figura 52 – Isocurvas de carga de pressão (m).

A Figura 52 mostra que, em quase todo o talude, as cargas de pressão são negativas evidenciando um fluxo em meios não-saturados.

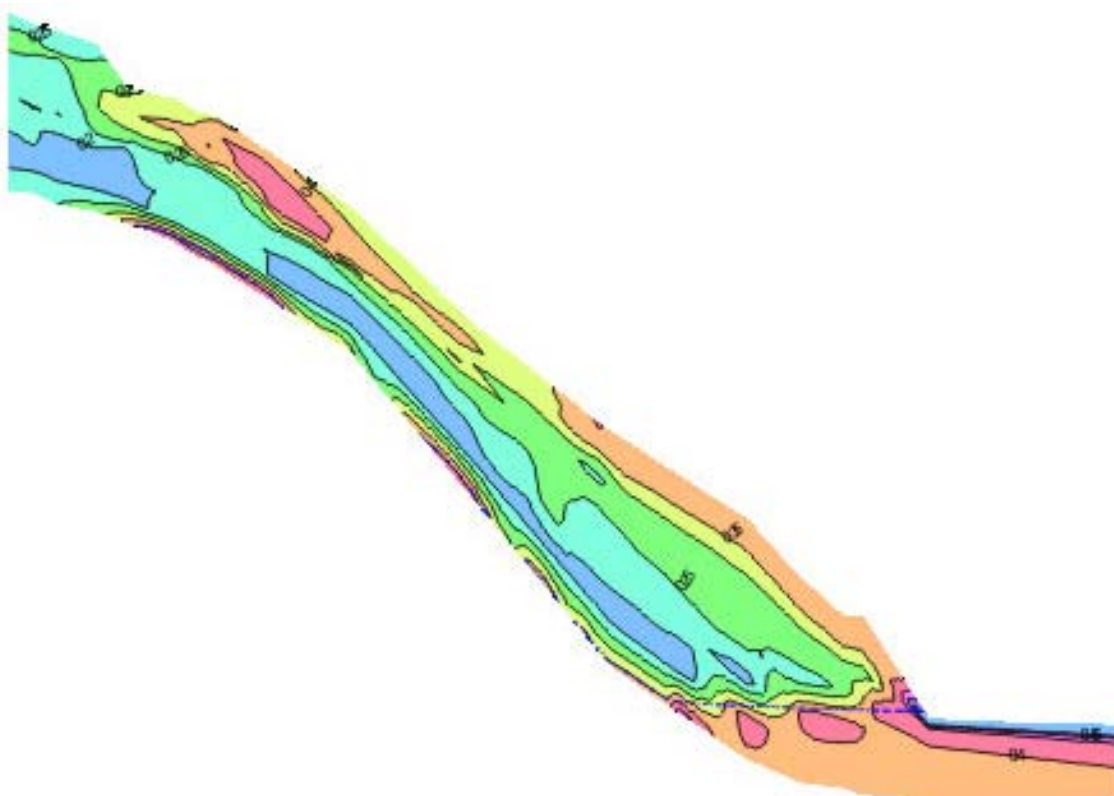


Figura 53 – Isocurvas do teor de água volumétrico.

Os valores de teores de umidade volumétricos apresentados na Figura 53 estão coerentes com as curvas fornecidas com os dados de entrada nas Figuras 48 a 50.

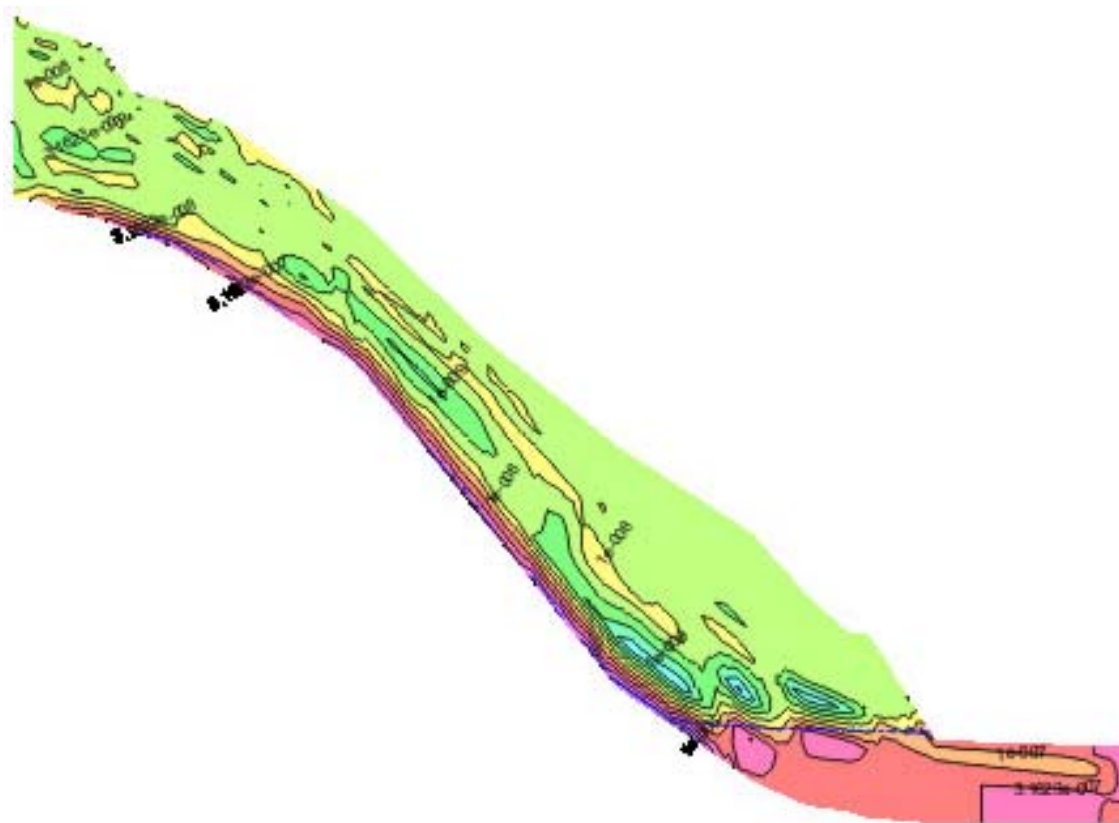


Figura 54 – Isocurvas de velocidade XY (m/s).

Na Figura 54 verifica-se que as velocidades obtidas na análise numérica são bem menores do que as utilizadas nos ensaios de coluna (Quadro 25). Isto quer dizer, que os ensaios de coluna que já são demorados, deveriam ter duração ainda bem maior.

Após o estudo feito pelo SEEP/W, iniciou-se o estudo do transporte de contaminantes, utilizando-se o módulo computacional CTRAN/W, que utiliza as velocidades de percolação obtidas anteriormente.

5.1. Obtenção dos resultados da percolação dos contaminantes.

O estudo de transporte de contaminantes necessita dos valores de D_e , α_L e α_T .

O valor de D_e foi obtido a partir da expressão:

$$D_e = \tau * D_o. \quad (5.1)$$

Onde τ é o fator de tortuosidade adimensional e D_o é o coeficiente de difusão em solução livre.

O parâmetro fator de tortuosidade adimensional leva em conta a maior distância de transporte e os caminhos mais tortuosos experimentados pelos solutos no processo de difusão através de meios porosos (SHACKELFORD, 1998). Esses valores de τ varia de 0,01 a 0,67, sendo 0,1 a 0,4 para solos de granulometria fina e de 0,5 a 0,7, caso os grãos aumentem de tamanho.

Baseado em valores encontrados na literatura, o coeficiente de difusão em solução livre (D_o) varia aproximadamente de $1E-06 \text{ cm}^2/\text{s}$ a $1E-05 \text{ cm}^2/\text{s}$ para solos saturados (REDDI, L.N.; INYANG, H.I., 2000).

Na literatura o valor de α_L é muito variável.

GELHAR e outros (1985) dizem que:

$$\alpha_L \cong x^2/100 \text{ m} \quad x \leq 100 \text{ m} \quad (5.2)$$

$$\alpha_L = 100 \text{ m} \quad x > 100 \text{ m} \quad (5.3)$$

em que x é a distância de transporte em metros.

A partir de uma série de experiências, FREEZE & CHERRY (1979), mostraram que a dispersividade longitudinal varia de $1E-04$ a $2E-02$ m, a depender do tipo de solo e de sua microestrutura.

REDDI e outros (2000) observaram que os valores da dispersividade estão intimamente relacionados à distribuição granulométrica do solo, estabelecidos da expressão:

$$\alpha = 1,75 * d \quad (5.4)$$

em que d é o diâmetro médio dos grãos.

Em relação a α_T , alguns pesquisadores (BREDEHOEF & PINDER, 1973; KONIKOW & BREDEHOEF, 1974), assumem, tomando como base observações empíricas, a seguinte relação:

$$\alpha_L = 3,0 * \alpha_T \quad (5.5)$$

DOMENICO & SCHWARTY (1990), citados por ROWE e outros (1995) dizem que, na maioria dos casos, as areias e depósitos granulares têm, normalmente, dispersividade transversal menor ou igual a 30% do valor da dispersividade longitudinal:

$$\alpha_T/\alpha_L \leq 0,3 \quad (5.6)$$

Este valor, entretanto, pode chegar até 10% da dispersividade longitudinal:

$$\alpha_T/\alpha_L \cong 0,1 \quad (5.7)$$

Neste trabalho, o valor de α_T foi obtido a partir do valor de α_L considerando-se:

$$\alpha_L = 3,0 * \alpha_T \quad (5.8)$$

que corresponde, aproximadamente, ao sugerido por BREDEHOEF & PINDER, 1973; KONIKOW & BREDEHOEF, 1974 e DOMENICO & SCHWARTY (1990) citados por ROWE e outros (1995).

Além disso, o fator de retardamento é fornecido indiretamente, via k_d (coeficiente de distribuição), utilizando-se a expressão:

$$k_d = n (R_d - \theta) / \gamma_d \quad (5.9)$$

onde $n = \theta$ supondo-se que S é igual a 1,0.

Em função destas considerações e dos valores de D_h e R_d , obtidos nos ensaios de coluna, adotaram-se os valores apresentados no Quadro 25. Deve-se dizer que para valores mais baixos de α_L não foi possível obter uma solução numérica estável e precisa.

Quadro 25 – Parâmetros de transporte fornecidos para a análise numérica

ELEMENTO	SOLO	PARÂMETROS										
		Condutividade k (m/s)	Teor de água volumétrico θ	Porosidade n(%)	Fator de retardamento Rd	Tortuosidade τ	Coef. de difusão em solução livre D_o (m ² /s)	Coef. de difusão efetivo D_e (m ² /s)	Dispersividade longitudinal α_L (m)	Dispersividade transversal α_T (m)	Peso específico seco γ (g/m ³)	Coef. de distribuição K_d (m ³ /g)
ZINCO	Argila 3,00 m	9,32E-06	5,81E-01	58,10	1,85	0,25	7,02E-10	1,76E-10	7,00	2,33	1,224E06	6,024E-07
	Argila 7,00 m	2,68E-06	4,22E-01	42,20	1,92	0,35	7,02E-10	2,46E-10	5,00	1,67	1,224E06	5,165E-07
	Areia	2,0E-05	3,9E-01	39,00	1,00	0,60	7,02E-10	4,21E-10	10,00	3,33	1,428E06	1,666E-07
CÁDMIO	Argila 3,00 m	9,32E-06	5,81E-01	58,10	2,00	0,25	7,17E-10	1,79E-10	7,00	2,33	1,224E06	6,736E-07
	Argila 7,00 m	2,68E-06	4,22E-01	42,20	1,92	0,35	7,17E-10	2,51E-10	5,00	1,67	1,224E06	5,165E-07
	Areia	2,0E-05	3,9E-01	39,00	1,00	0,60	7,17E-10	4,30E-10	10,00	3,33	1,428E06	1,666E-07
COBRE	Argila 3,00 m	9,32E-06	5,81E-01	58,10	3,75	0,25	7,13E-10	1,78E-10	7,00	2,33	1,224E06	1,504E-06
	Argila 7,00 m	2,68E-06	4,22E-01	42,20	3,13	0,35	7,13E-10	2,50E-10	5,00	1,67	1,224E06	9,336E-07
	Areia	2,0E-05	3,9E-01	39,00	1,00	0,60	7,13E-10	4,28E-10	10,00	3,33	1,428E06	1,666E-07
CHUMBO	Argila 3,00 m	9,32E-06	5,81E-01	58,10	5,00	0,25	9,25E-10	2,31E-10	7,00	2,33	1,224E06	2,098E-06
	Argila 7,00 m	2,68E-06	4,22E-01	42,20	4,53	0,35	9,25E-10	2,78E-10	5,00	1,67	1,224E06	1,416E-06
	Areia	2,0E-05	3,9E-01	39,00	1,00	0,60	9,25E-10	5,55E-10	10,00	3,33	1,428E06	1,666E-07

Nas Figuras 55 a 66 estão mostrados os gráficos de adsorção dos elementos zinco, cádmio, cobre e chumbo para os solos “Argila 3,00 m”, “Argila 7,00 m” e “Areia”. Nestes gráficos k_d corresponde à inclinação das retas.

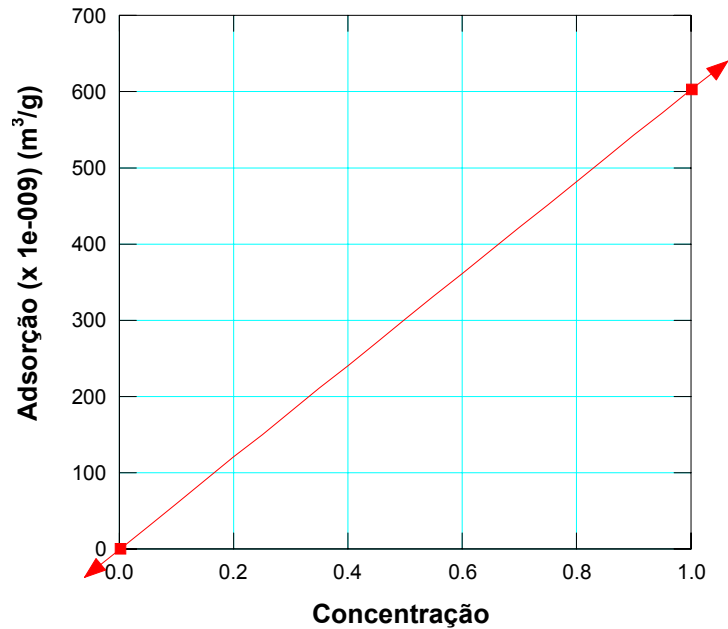


Figura 55 - Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento zinco na “Argila 3,00 m”.

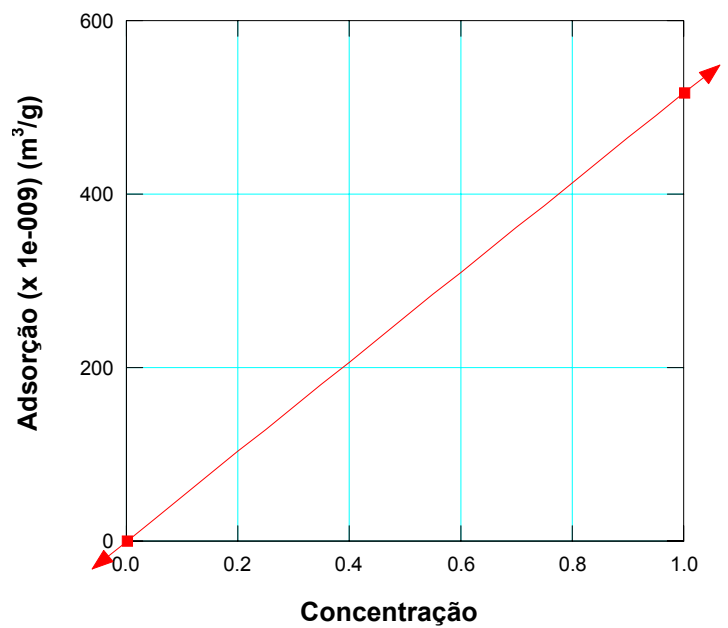


Figura 56 – Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento do zinco na “Argila 7,00 m”.

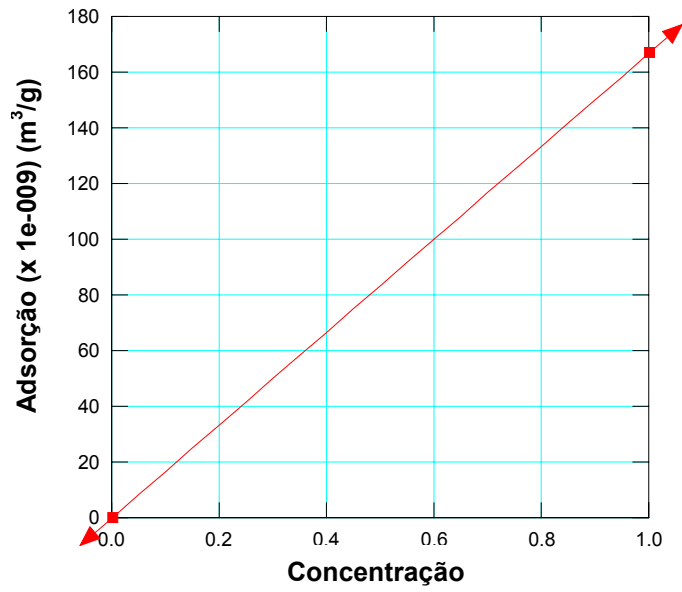


Figura 57 – Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento zinco na “Areia”.

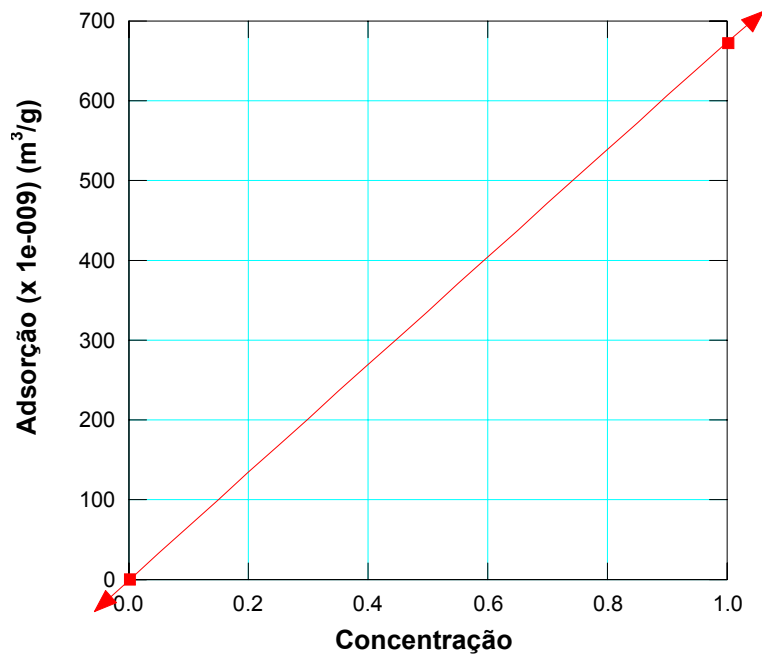


Figura 58 – Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento cádmio na “Argila 3,00 m”.

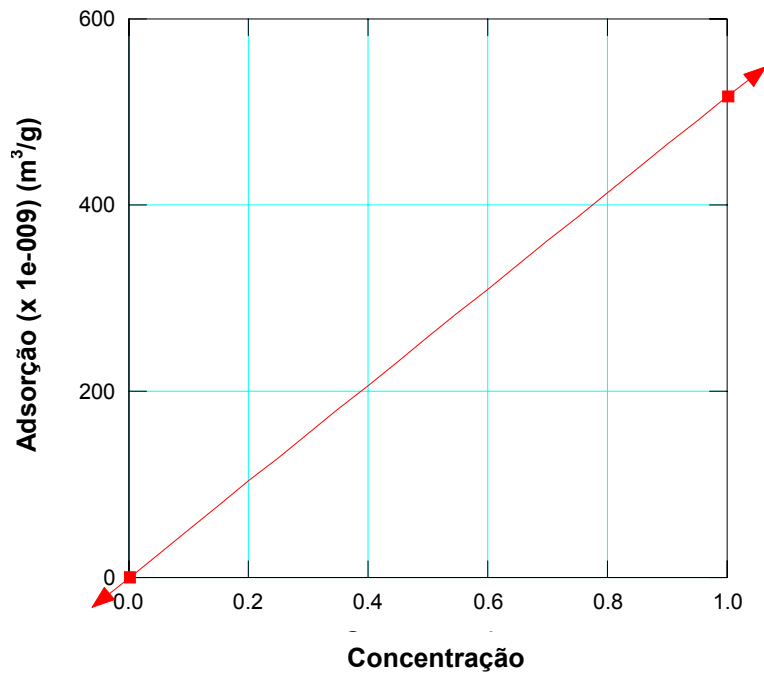


Figura 59 – Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento cádmio na “Argila 7,00 m”.

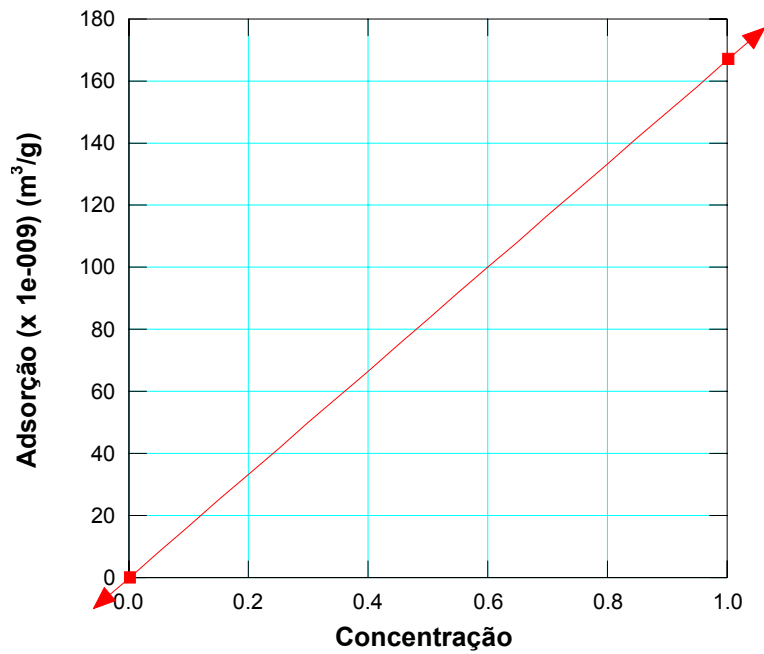


Figura 60 – Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento cádmio na “Areia”.

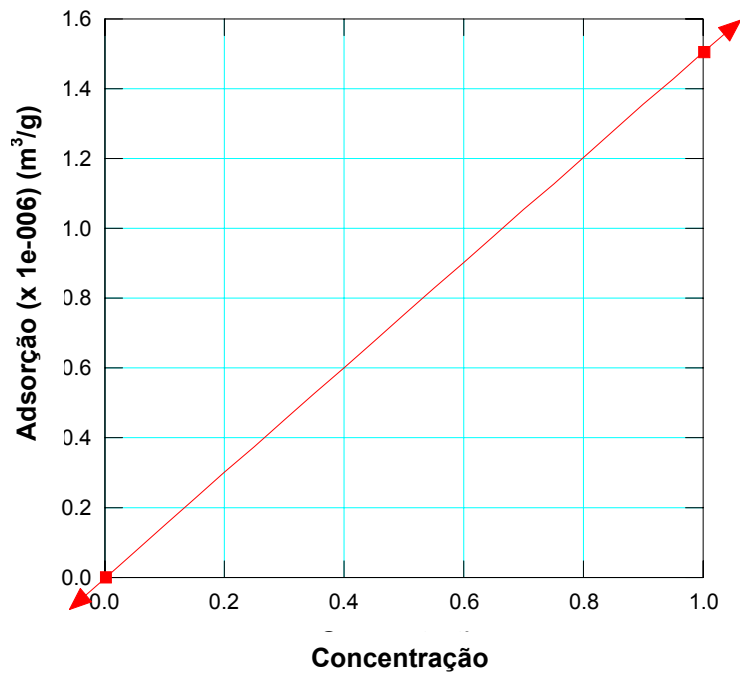


Figura 61 – Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento cobre na “Argila 3,00 m”.

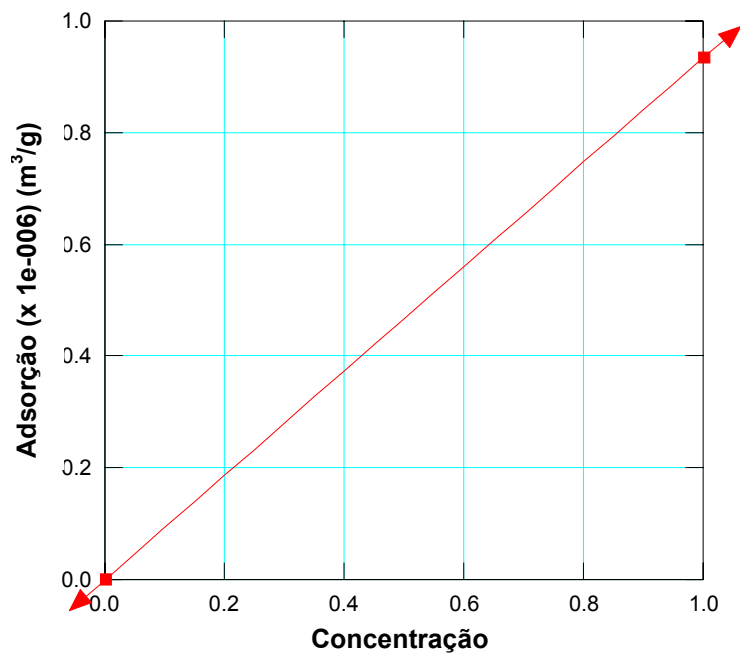


Figura 62 – Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento cobre na “Argila 7,00 m”.

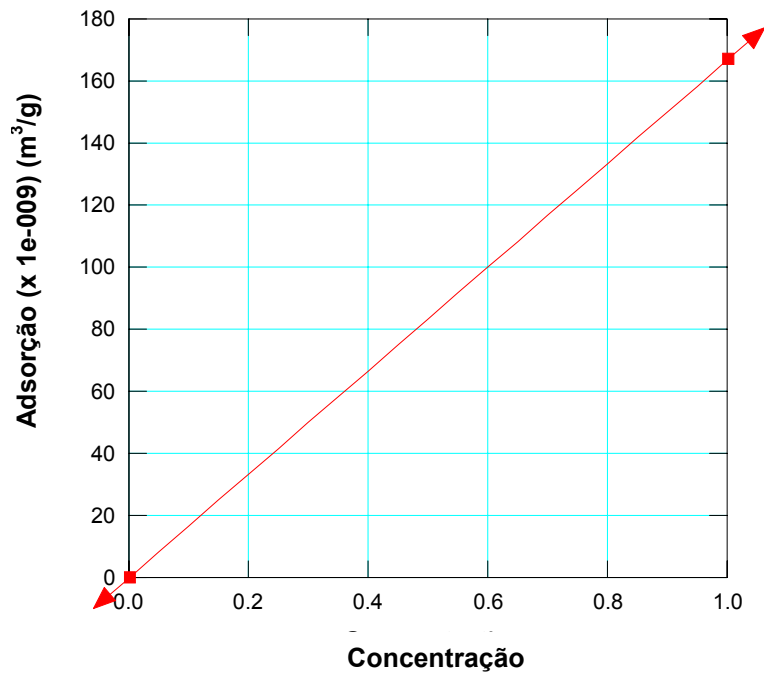


Figura 63 – Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento cobre na “Areia”.

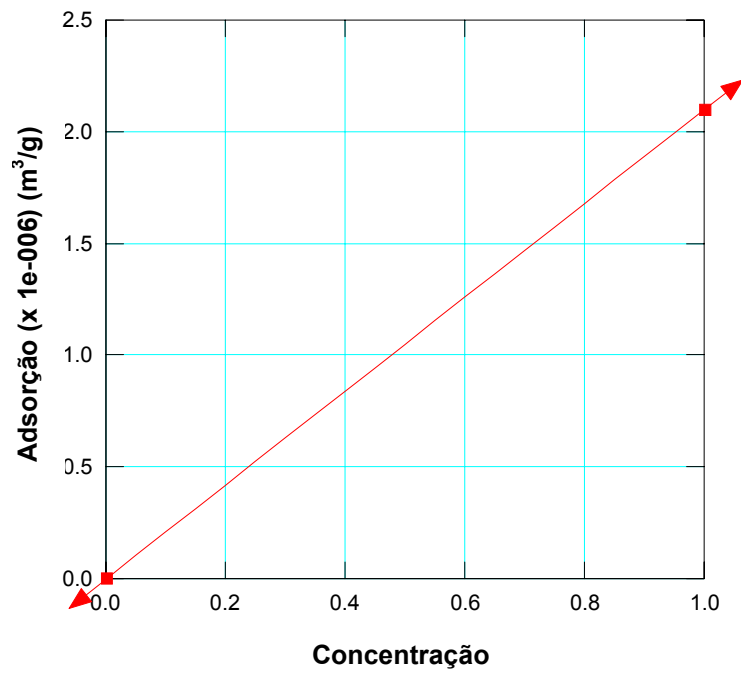


Figura 64 – Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento chumbo na “Argila 3,00 m”.

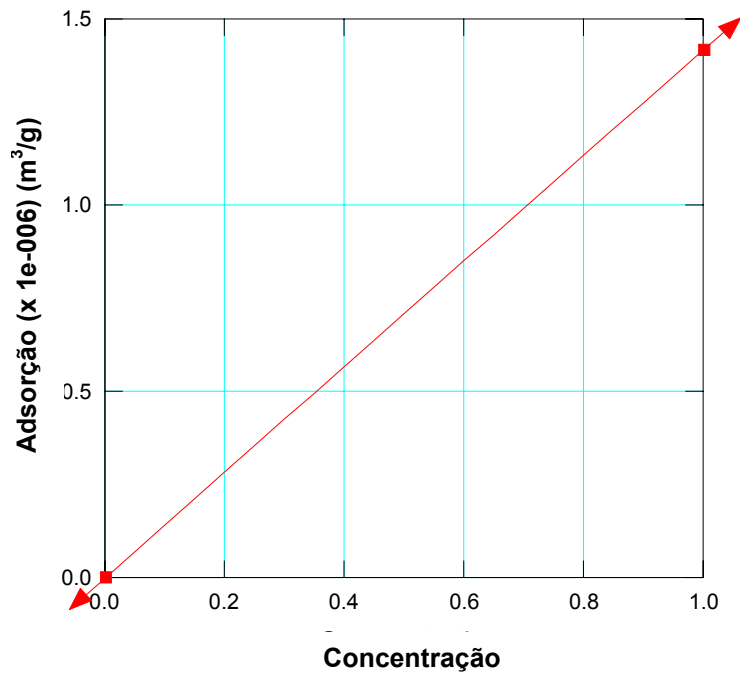


Figura 65 – Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento chumbo na “Argila 7,00 m”.

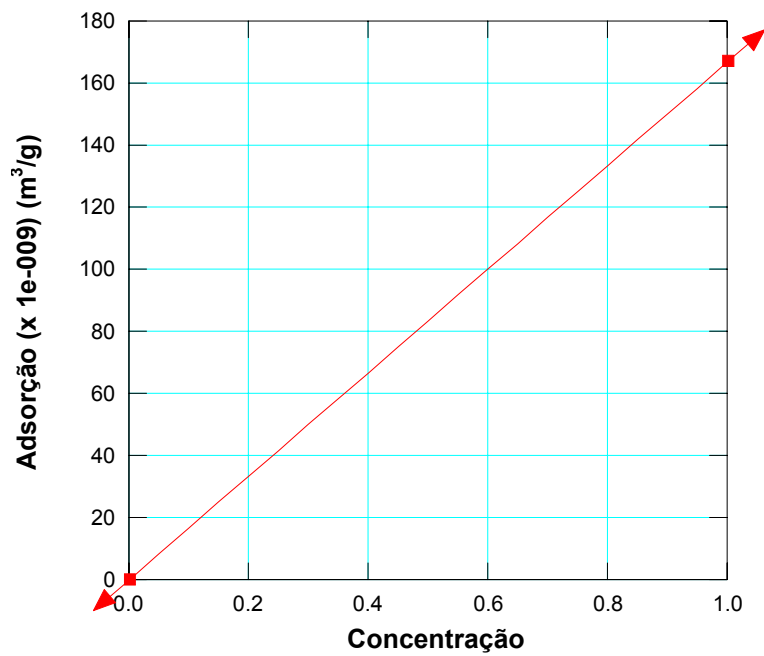


Figura 66 – Função de adsorção (m^3/g) versus concentração do elemento chumbo na “Areia”.

A precisão dos resultados numéricos depende dos números de Peclet (P) e Courant (C) estarem dentro dos limites:

$$P = V * \frac{\Delta L}{D_h} \leq 2 \quad (5.10)$$

$$C = V * \frac{\Delta t}{\Delta L} \leq 1 \quad (5.11)$$

Onde:

ΔL é o comprimento na direção do elemento, V é a velocidade de percolação, D_h é o coeficiente de dispersão-difusão e Δt é o intervalo de tempo.

No Quadro 26 estão apresentados os valores destes números obtidos nas análises.

Quadro 26 – Limites de Peclet e Courant na análise numérica

ELEM.	PECLET		PECLET		COURANT		COURANT	
	X		Y		X		Y	
	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX
ZINCO	0,202789	2,69347	0,0824786	1,07142	0	0,845551	0	1,64236
CÁDMIO	0,202789	2,69347	0,0824782	1,07171	0	0,845551	0	1,64236
COBRE	0,202789	2,689346	0,0824783	1,07166	0	0,845551	0	1,64236
CHUMBO	0,202785	2,69342	0,0824706	1,0757	0	0,845551	0	1,64236

Observa-se no Quadro 26 que os números de Peclet máximo na direção X violaram o limite recomendado. Entretanto, como isto só ocorreu em uns poucos pontos nodais, esta violação não interferiu na precisão e estabilidade dos resultados.

5.1.1. Evolução da pluma de contaminação em relação ao tempo

Baseado nos dados expostos acima, pôde-se determinar a pluma de contaminação de cada elemento químico avaliada para períodos de 15 e 30 anos.

Comparando a percolação dos 4 contaminantes nas camadas do lixão, foram agrupadas as diversas plumas em um mesmo intervalo de tempo, como é mostrado a seguir. O transporte foi estudado em porcentagem e na área na qual existia lixo, supôs-se uma concentração de 100%.

• Zinco

Nas Figuras 67 e 68 estão apresentadas as evoluções das plumas de contaminação do zinco em períodos de tempo de 15 e 30 anos.

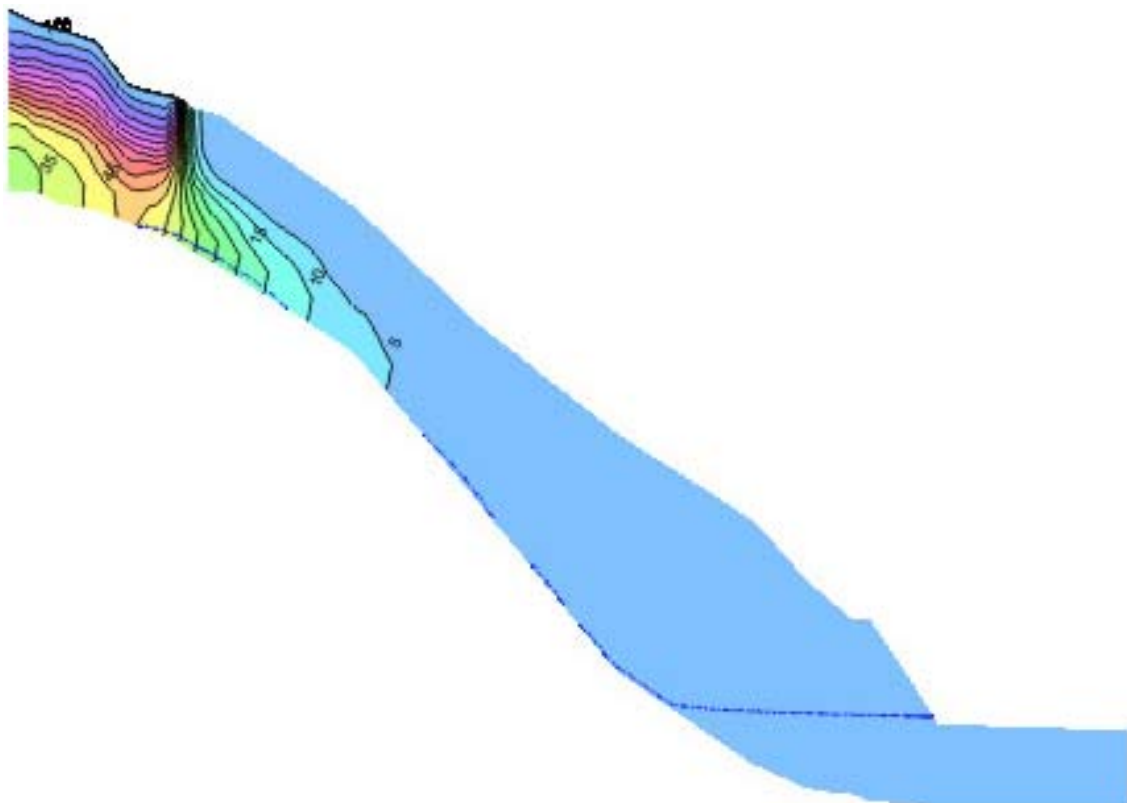


Figura 67 – Isocurvas de concentração de zinco após 15 anos.

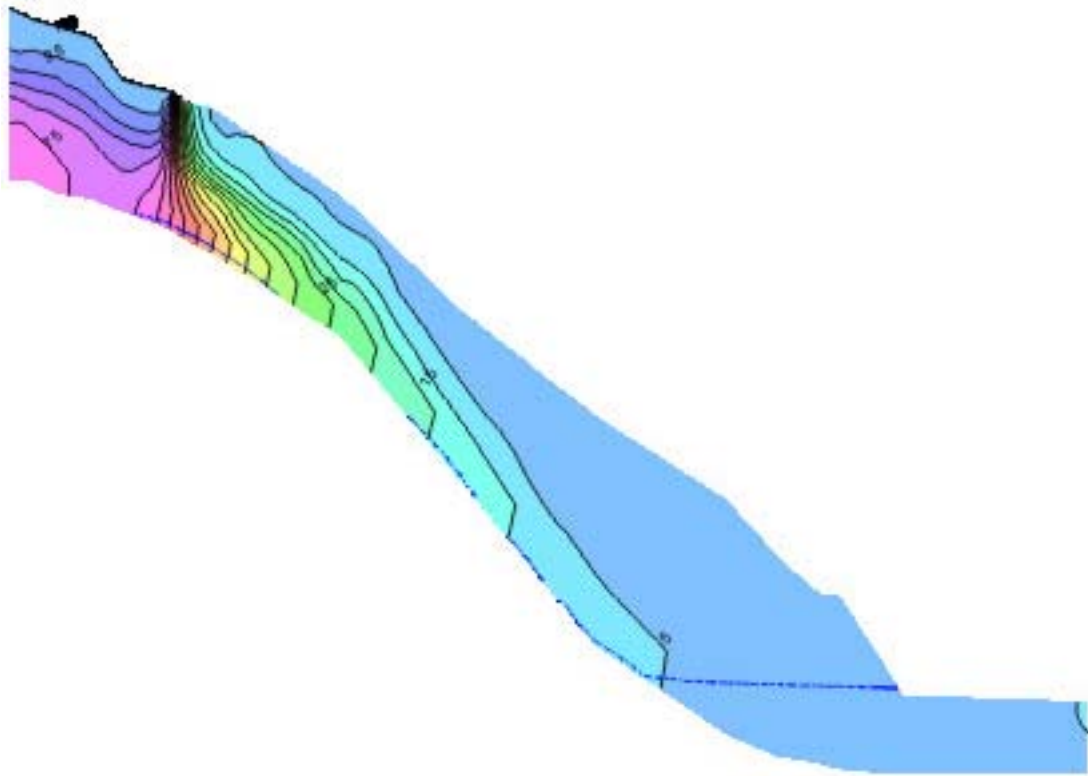


Figura 68 – Isocurvas de concentração de zinco após 30 anos.

- **Cádmio**

Nas Figuras 69 e 70 estão apresentadas as evoluções das plumas de contaminação do cádmio em períodos de tempo de 15 e 30 anos.

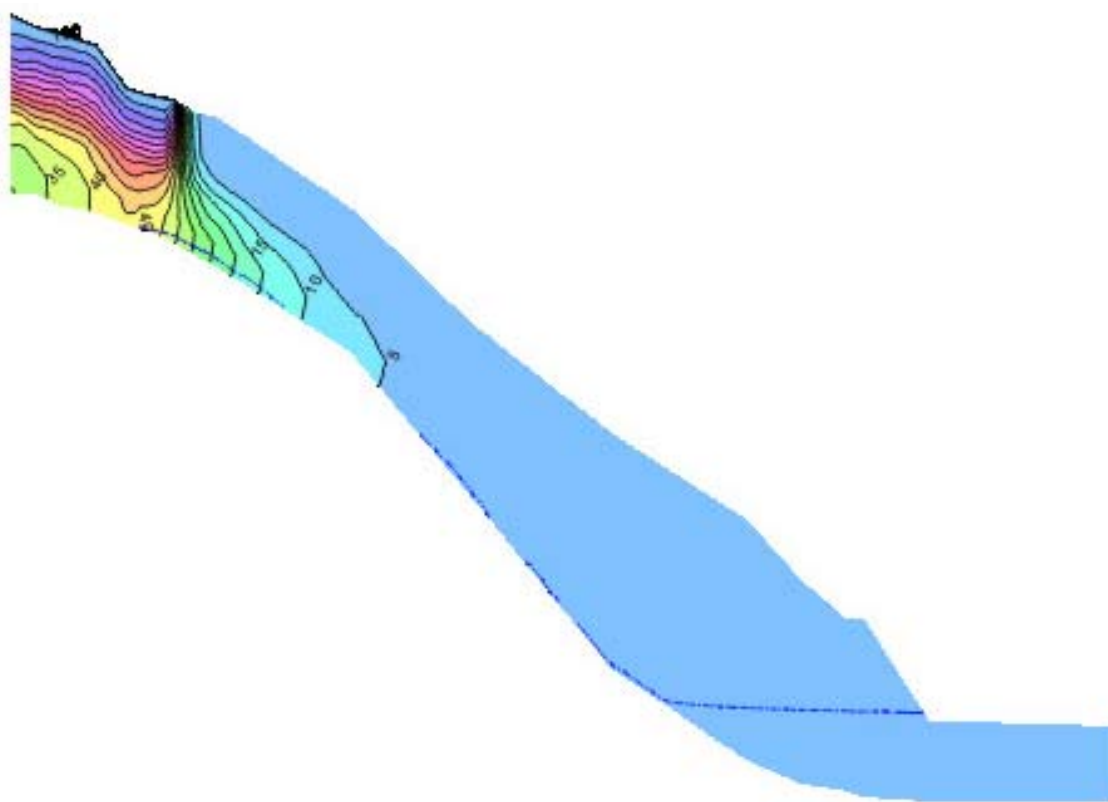


Figura 69 – Isocurvas de concentração de cádmio após 15 anos.

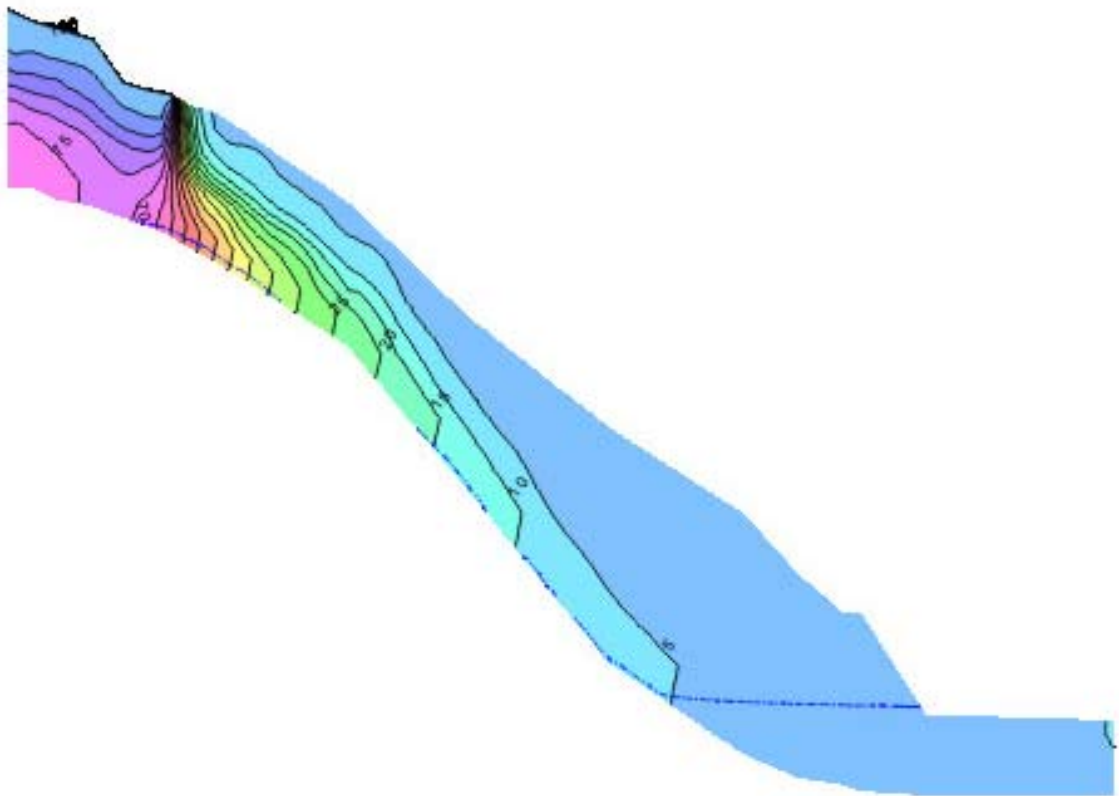


Figura 70 – Isocurvas de concentração de cádmio após 30 anos.

- **Cobre**

Nas Figuras 71 e 72 estão apresentadas as evoluções das plumas de contaminação do cobre em períodos de tempo de 15 e 30 anos.

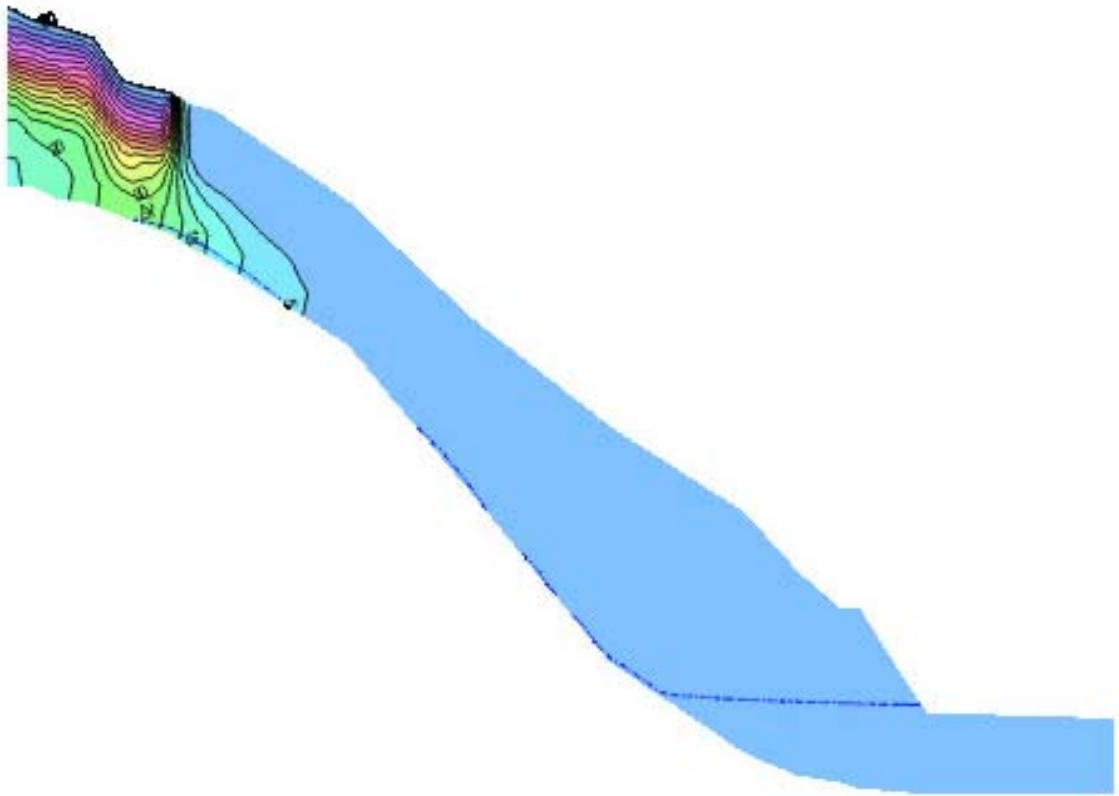


Figura 71 – Isocurvas de concentração de cobre após 15 anos.

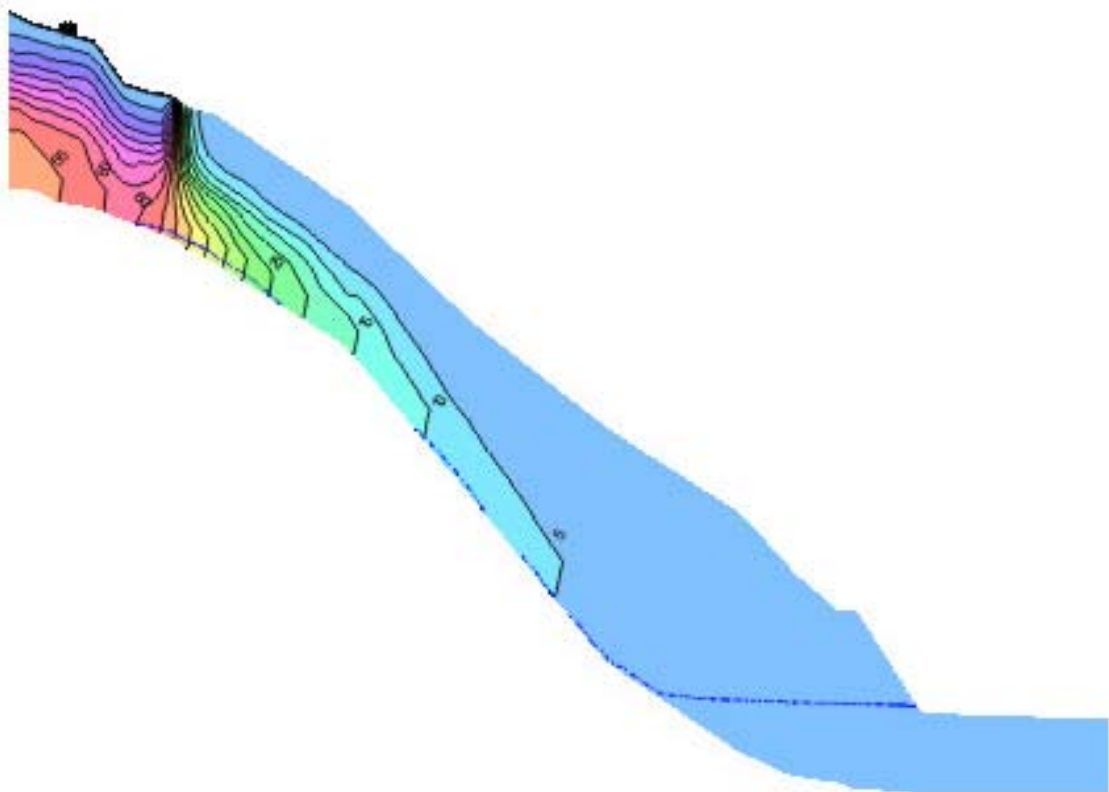


Figura 72 – Isocurvas de concentração de cobre após 30 anos.

- **Chumbo**

Nas Figuras 73 e 74 estão apresentadas as evoluções das plumas de contaminação do chumbo em períodos de tempo de 15 e 30 anos.

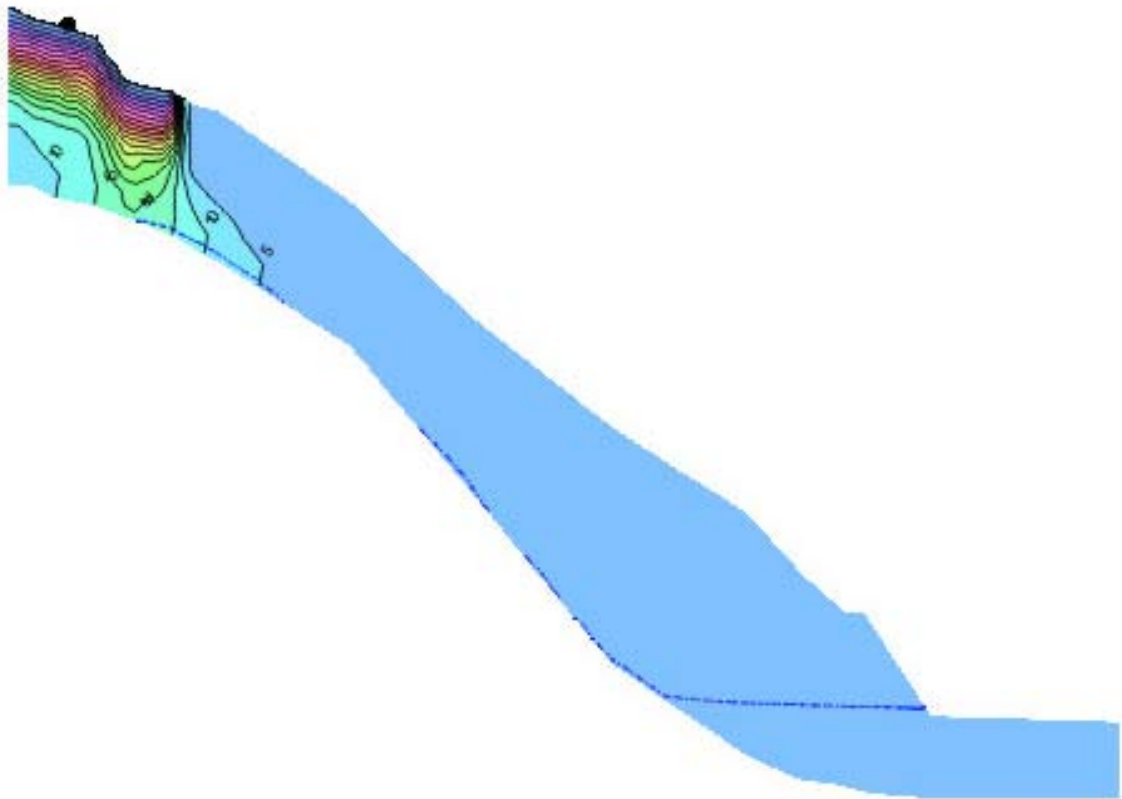


Figura 73 – Isocurvas de concentração de chumbo após 15 anos.

Quadro 27 – Concentração (mg/L) de metais pesados de líquidos percolados de vários aterros

Aterros Sanitários		Concentrações (mg/L)			
		ZINCO	CÁDMIO	COBRE	CHUMBO
V. Albertina	Mínimo	0,5	0,01	0,06	0,18
	Máximo	35,6	0,2	1,2	2,3
Eg Goulart	Mínimo	0,12	0	0,01	0
	Máximo	9,4	0,02	0,19	0,22
R.Tavares	Mínimo	0,72	-	0,14	0,3
	Máximo	1,5	-	0,67	0,5
Pedreira	Mínimo	3,2	-	0,09	0,3
	Máximo	9	-	0,21	0,9
Santo André	Mínimo	0,167	0	0,05	0,1
	Máximo	2,5	0,02	2,11	3,352
Bandeirantes	Mínimo	0,07	0	0,01	0
	Máximo	0,78	0,01	0,02	0,25
Itapecerica	Mínimo	0,06	0	0,03	172
	Máximo	1,28	0,01	0,05	370
B. Horizonte	Mínimo	0,012	ND	0,009	ND
	Máximo	0,235	ND	0,029	0,02
Jangurussú	Média	13,68	-	-	0
Rowe e outros (1989) p. 42	Mínimo	5	0	0	0
	Máximo	67	1,95	< 0,1	4,46
GERAL	Mínimo	0,012	0	0	0
	Máximo	67	0,2	2,11	370

O Quadro 28 apresenta os valores de concentrações em porcentagem obtidos através da análise numérica nos nós correspondentes aos piezômetros 1, 2, 3 e 4.

Quadro 28 – Concentração (%) aos 15 anos

NÓ	PIEZ	CONCENTRAÇÃO (%)			
		ZINCO	CÁDMIO	COBRE	CHUMBO
160	1	0,2716	0,2583	0,0970	0,0457
159	2	0,0631	0,0596	0,0200	0,0087
145	3	0,0076	0,0070	0,0016	0,0005
142	4	0,0061	0,0056	0,0012	0,0004

O Quadro 29 apresenta as comparações entre as concentrações obtidas numericamente e no campo

Quadro 29 – Comparação da concentração (mg/L) aos 15 anos

ELEMENTO	CONCENTRAÇÃO (mg/L)				
	NÓ	160	159	145	142
	PIEZÔMETRO	1	2	3	4
ZINCO	Mínimo	3,26E-05	7,57E-06	9,12E-07	7,32E-07
	Máximo	18,2E-02	4,23E-02	5,09E-03	4,09E-03
	Campo	3,30E-03	7,00E-03	3,20E-02	1,10E-02
CÁDMIO	Mínimo	0	0	0	0
	Máximo	5,17E-04	1,19E-04	1,40E-05	1,12E-05
	Campo	3,00E-03	5,00E-03	0	6,00E-03
COBRE	Mínimo	0	0	0	0
	Máximo	2,05E-03	4,22E-04	3,38E-05	2,53E-05
	Campo	0	0	0	0
CHUMBO	Mínimo	0	0	0	0
	Máximo	1,69E-01	3,22E-02	1,85E-03	1,48E-03
	Campo	0	3,00E-03	0	3,10E-03

As concentrações calculadas pela análise numérica foram, na maioria dos casos, compatíveis com os valores de campo reportados na literatura.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Tendo em vista os objetivos propostos nesta pesquisa e os resultados alcançados, algumas conclusões foram obtidas:

- i) O ensaio de coluna de lixiviação mostrou-se muito confiável e fácil de executar. Entretanto o ensaio é normalmente demorado, podendo durar algumas semanas, e necessita coletar efluentes em pequenos intervalos de tempo durante toda a sua duração;
- ii) Os parâmetros de transporte de contaminante R_d e D_h obtidos no ensaio apresentaram valores semelhantes aos encontrados na literatura (MATOS, 1995);
- iii) O zinco e o cádmio foram os metais pesados transportados mais rapidamente na encosta abaixo do local de deposição do lixo, enquanto o cobre e o chumbo foram os metais pesados transportados mais lentamente;
- iv) As simulações mostraram que o valor do parâmetro R_d é o que mais influencia os resultados;
- v) A dispersividade obtida no laboratório foi muito baixa, impossibilitando a análise numérica. Como encontrou-se uma grande variação deste parâmetro na literatura, optou-se por utilizar valores mais elevados que permitiram obter resultados numéricos.

- vi) As concentrações calculadas pela análise numérica foram, na maioria dos casos, compatíveis com os valores de campo reportados na literatura.

Para finalizar, tendo em vista a necessidade do melhor conhecimento da relação entre a disposição de resíduos sólidos e a contaminação de recursos hídricos subterrâneos, tem-se como sugestão para trabalhos posteriores:

- i) Fazer ensaios de coluna segundo a nova técnica proposta por SHACKELFORD (1995) (acumulação de massa) que diminui o número de coleta de efluentes durante o ensaio;
- ii) Fazer ensaios de equilíbrio em lote para determinar o fator de retardamento;
- iii) Estudar uma maneira de se determinar melhor o valor do coeficiente de dispersividade;
- iv) Considerar a diminuição da concentração de entrada com o tempo;
- v) Estudar a composição do percolado de Viçosa;
- vi) Determinar por meio de ensaios de laboratório os parâmetros da camada de areia fina siltosa;
- vii) Fazer uma análise em 3-D do problema estudado na tese;
- viii) Utilizar os piezômetros já instalado para continuar o monitoramento das águas subterrâneas da região;
- ix) Melhorar o procedimento para coleta de amostra de água no campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9604**; Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro, 1986.
- AZEVEDO, R.F. **Projeto executivo do Aterro Sanitário do Município de Viçosa (MG)**. 2001.
- BAGARELLO, V.; PROVENZANO, G. **Factors affecting field and laboratory measurement of saturated hydraulic conductivity**. Transactions of the ASAE, St. Joseph, V. 39, nº 1, p. 153-159, 1986.
- * BOYLE, W.C.; HAM, R.K. **Biological treatability of landfill leachate**. Journal Water Poll. Control Fed., V. 46, nº 5, p. 860-872, 1974.
- * BREDEHOEFT, J. & PINDER, G. **Mass transport in flowing groundwater**. Water Resources Research, V. 6, p. 194-210, 1973.
- CARVALHO, A.R. **Processo de complexação do ferro em águas subterrâneas – uma proposta de mudança da portaria 36 do Ministério da Saúde**. Guarulhos: UnG, 2000. 136p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade de Guarulhos, 2000.

- * CHIAN, E. S.K.; DEWALLE, F.B. **Sanitary landfill leachates and their treatment.** Journal of the Environmental Engineering Division, V. 102, p.411-431, 1976.

- * CHRISTENSEN, T. H.; KJELDEN, P. **Sanitary landfilling: process, technology and environmental impact.** New York: Academic Press, 1989. Cap.: Basic Biochemical Processes in Landfills, p. 29-49. 1989.

- * CHU L.M.; CHEUNG, K.C.; WONG, M.N. **Variations in the chemical properties of landfill leachate.** Environ. Management, V. 18, nº 1, p. 105-117, 1994.

- * CLEMENTE, R.S.; PRASHER, S.O; BARRINGTON, N. F.; PESTFADE, A. **A new pesticide fate and transport model: model development and verification.** Transactions of the ASAE, St. Joseph, V. 36, nº 2, p. 357-367, 1993.

- COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **Guia de coleta e preservação de amostras de água.** São Paulo, 1988, 151 p.

- COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **Relatório de qualidade ambiental.** Projeto entre serras e águas. São Paulo, 1998, 128 p.

- COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **06.010.** Construção de poços de monitoramento de aquífero freático. São Paulo, 1988, 37 p.

- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução CONAMA nº 20, de 18 de junho de 1986.**

- CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL – COPAM. **Deliberação Normativa nº 10/86 (MG).**

- CORRÊA SOBRINHO, N.L. **Análise do balanço hídrico em aterros sanitários.** Viçosa: UFV, 2000. 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, 2000.

- * DOMENICO, P.A & SCHWARTZ, F.W. **Physical and Chemical Hydrogeology.** John Wiley, New York, 1990.

FREEZE, R.A & CHERRY, J.A **Groundwater**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1979.

GADOTTI, R.F. **Avaliação da contaminação das águas superficiais e subterrâneas adjacentes ao “lixão” da cidade de São Carlos**. São Carlos: EESC/USP, 1997. 150p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 1997.

* GELHAR, L.W.; MANTOGLOU, A; WELTY, C. & REHFELDT, K.R. **A review of field-scale physical solute transport process in saturated and unsaturated porous media**. Electric Power Research Institute EPRI EA-4190 Project 2485-5, 1985.

GEO-SLOPE, User's Guide – **SEEP/W for finite element seepage analysis** – Version 4, Geo-Slope International Ltd., Calgary, Canadá, 1998.

_____. User's Guide – **CTRAN/W for finite element contaminant transport analysis** - Version 4, Geo-Slope International Ltd., Calgary, Canadá, 1998.

GERMANO, A.M. **Estudo numérico do transporte de metais pesados na área do lixão da cidade de Viçosa (MG)**. Viçosa: UFV, 2001. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, 2001.

GOMES, L. **Estudo da caracterização física e da biodegradabilidade dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários**. São Carlos: EESC/USP, 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 1989.

HO, S.; BOYLE, W.C.; HAM, R.I. **Chemical treatment of leachates from sanitary landfills**. Jour. Water Poll. Control Fed., V. 46, nº 7, p. 1776-1791, 1974.

KOERNER, R.M; DANIEL, D.E. **Final covers for solid waste landfills and abandoned dumps**. Thomas Telford. Asce Press, 1998, 256 p.

* KONIKOW, L. & BREDEHOEFT, J. **Modeling flow and chemical quality changes in na irrigated stream-aquifer system**. Water Resources Research, V. 10, p. 546-562, 1974.

- KLUTE, A; DIRKSEN, C. **Hidraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods.** In: KLUTE, A **Methods of soil analysis: part 1** – Physical and mineralogical methods, Madison: Soil Science Society of America, p. 687-766, 1986.
- LEITE, E.H.B. da C.; REIS FILHO, A SILVA, E.M.R. da. **Avaliação da produção do percolado do lixo e da capacidade filtrante de aterros sanitários.** Engenharia Sanitária, V. 21, jan-mar., p. 90-99, 1982.
- LOPES, A.S. **Solos sob “cerrado”. Características, propriedades e manejo.** Piracicaba: Associação brasileira para pesquisa da potassa e do fosfato. 162 p. 1984.
- * MANTELL, C.L. **Solid Wastes: origin, collection, processing and disposal.** New York. Willey – Interscience. 1127 p. 1975.
- MATOS, A.T. **Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão do zinco, cádmio, cobre e chumbo em solos do município de Viçosa – MG.** Viçosa: UFV, 1995. 110p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 1995.
- MENEZES, D.B. **Diagnóstico dos impactos do depósito de resíduos sólidos de São Carlos (SP) no meio físico.** São Carlos: EESC/USP, 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 1994.
- MOTA, F.S.B. **Aterro sanitário e poluição da água.** São Paulo: USP, 1974. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Saúde Pública, da Universidade de São Paulo, 1974.
- NOBRE, M.de M.M. **Estudo experimental do transporte de poluentes em solos argilosos compactados.** Rio de Janeiro: PUC, 1987. 214p. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1987.
- * O’LEARY, P. & WALSH, P. **Leachate control and treatment.** In: Solid waste landfill correspondence course, 1997.
- OLIVEIRA, M.R.L.de. **Caracterização do percolado do “lixão” do Jangurussu e seu possível impacto no rio Cocó.** Fortaleza: UFC, 1997. 79p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, 1997.

- ORTH, M.H. de A. **Aterros sanitários**. Revista de Limpeza Pública. São Paulo. V 8, nº 20. P. 26-34, 1981.
- PAIVA, J.O. **Qualidade das águas subterrâneas da região norte ao “lixão” do Jangurussu**. Fortaleza: UFC, 1998. 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, 1998.
- PEREIRA NETO, J.T. **Quanto vale o nosso lixo**. Projeto Verde Vale. Viçosa: UFV, 1999. 70 p. Departamento de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- PRANDINI, F.L.; D’ALMEIDA, M.L.O.; JARDIM, N.S.; MANO, V.G.T. & WELLS, C. **Lixo municipal: Manual de gerenciamento integrado**. 1ª Edição, São Paulo, IPT/ABGE/CEMPRE. Publicação IPT 2163, 1995. 278p.
- RIOS, L. **Estudo liminológico e fatores ecológicos em ribeirões e córregos da bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão (Estado de São Paulo)**. São Carlos: EESC. 1993. 146 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 1993.
- REDDI, L.N.; INYANG, H.I. **Geoenvironmental engineering – Principles and applications**. Marcel Dekker, 2000. 494 p.
- ROBINSON, H.; GRONOW, J. **Groundwater protection in the UK: Assessment of the landfill leachate source-term**. Journal of the institution of water and environmental management, V. 6, nº 2, apr, p. 229-236. 1992.
- ROWE, R.K.; QUIGLEY, R.M. & BOOKER, J.R. **Clayey barrier systems for waste disposal facilities**. E & SPON, Londres, 1995. 390p.
- SCHALCH, V.; LEITE, W.C.A; GOMES, L.P. **Curso sobre gerenciamento integrado de resíduos sólidos [s.l.]: ABES, 127 p. 1995.**
- SCHALCH, V.; MORAES, A.J. **Biogás – a energia vinda do lixo urbano e sua relação com a produção e características do chorume**. Revista de Limpeza Pública. São Paulo, julho-agosto, p. 21-30, 1988.
- * SCHRAB, G.E.; BROWN, K.W.; DONNELLY, K.C. **Acute and genetic toxicity of municipal landfill leachate**. Water, air, and soil pollution, V. 69, p. 99-112, 1993.

* SHACKELFORD, C.D. **Cumulative mass approach for column testing.** Journal of geotechnical engineering, V. 121, nº 10, p. 696-703, october 1995.

SHACKELFORD, C.D.; ROWE, R.K. **Contaminant transport modeling.** In: CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTCHNICS. Proceedings Lisboa, p. 939-956, 1998

SOUZA, H.A. **Estudo da contaminação ambiental na área do aterro sanitário da BR-040, da prefeitura municipal de Belo Horizonte (MG).** Ouro Preto: UFOP, 1998. 147 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geologia da Escola de Minas, da Universidade Federal de Ouro Preto, 1998.

TEIXEIRA, D. **Caracterização liminológica dos sistemas lóticos e variação temporal e espacial de invertebrados bentônicos na Bacia do Ribeirão do Feijão (Estado de São Paulo).** São Carlos: EESC, 1993. 193 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 1993.

VIEIRA, V. **Caracterização preliminar do risco geológico da área urbana de Viçosa (MG).** Viçosa: UFV, 2000. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, 2000.

Von SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgostos.** Belo Horizonte: UFMG, 1996. 243 p., V. 1. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais.

OBSERVAÇÕES: * Referências citadas na tese.