

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA**

**ANALISE DO TRANSPORTE MULTIESPÉCIE  
DO LIXIVIADO DE MORAVIA/COLÔMBIA  
POR MEIO DE ENSAIOS EM COLUNA EM ESCALA  
DE CAMPO E LABORATÓRIO**

**ORLY TATIANA CASTAÑEDA ROJAS**

**ORIENTADOR: PROF. ANDRÉ LUÍS BRASIL  
CAVALCANTE, DSc**  
**CO-ORIENTADOR: PROF. HERNÁN EDUARDO MARTÍNEZ  
CARVAJAL, DSc**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM 229/2013**

**BRASÍLIA / DF: AGOSTO DE 2013.**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA**

**ANALISE DO TRANSPORTE MULTIESPÉCIE  
DO LIXIVIADO DE MORAVIA/COLÔMBIA  
POR MEIO DE ENSAIOS EM COLUNA EM ESCALA  
DE CAMPO E LABORATÓRIO**

**ORLY TATIANA CASTAÑEDA ROJAS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**PROF. ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, DSc (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**PROF. HERNÁN EDUARDO MARTINEZ CARVAL, DSc (UnB)  
(CO-ORIENTADOR)**

---

**PROF. LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**PROF. REJANE NASCENTES, DSc (UFV)  
(EXAMINADORA EXTERNA)**

**DATA: BRASÍLIA, 20 DE AGOSTO DE 2013.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

CASTAÑEDA, ORLY. T

Análise do transporte multiespécie do lixiviado de Moravia/Colômbia por meio de ensaios em coluna em escala de campo e laboratório

(xxi), 102 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2013)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Contaminação de solos

2. Ensaio em coluna em campo

3. Metais pesados

4. Ensaios em coluna em laboratório

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

CASTAÑEDA, O.T. (2013) Análise do transporte multiespécie do lixiviado de Moravia/Colômbia por meio de ensaios em coluna em escala de campo e laboratório. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM 229/2013, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 102 p.

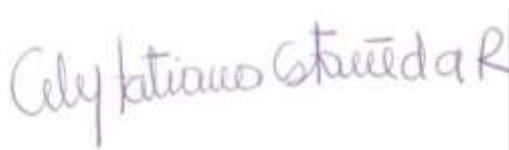
## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Orly Tatiana Castañeda Rojas

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise do transporte multiespécie do lixiviado de Moravia/Colômbia por meio de ensaios em coluna em escala de campo e laboratório

GRAU / ANO: Mestre / 2013

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



---

**Orly Tatiana Castañeda Rojas**

[taty613@gmail.com](mailto:taty613@gmail.com)

## DEDICATÓRIA

À Deus que está sempre comigo,  
Minha mãe Martha Cecilia Rojas Castañeda,  
Meu esposo Juan Esteban García Sierra e ao  
meu príncipe Matías García Castañeda.

## AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial ao professor André Luís Brasil Cavalcante pela confiança, compreensão, paciência, orientação no entendimento de novos conceitos, dedicação constante e disposição em todo momento.

Ao professor Hernán Eduardo Martínez Carvajal pela ajuda, fornecendo ideias essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Programa de Pós Graduação em Geotecnia e aos órgãos de financiamento da pesquisa CNPq e Universidad Nacional de Colômbia pelo apoio econômico.

Ao Brasil e seu povo, que fizeram minha estadia em Brasília parecer como se eu estivesse em casa, especialmente para a Carol, Renata, Jessica, Tatiane e Livia.

Ao pessoal da Colômbia: Oscar Echeverri, Yamile Valencia, Vanesa Senior, Eduardo Montoya, Mauricio Palacio, Jose Zuleta, aos técnicos do laboratório da Geotecnia Yeni e Duvian. Obrigada pela ajuda nesta pesquisa.

À minha mãe Martha Cecilia Rojas, aos meus tios Pedro, Beatriz e Jairo e aos meus irmãos Jonathan e Cristian, pelo amor e apoio incondicional.

E, finalmente, ao meu esposo Juan Esteban e meu filho Matías, por brindar felicidade a cada momento da minha vida e por serem eles à minha motivação neste trabalho.

## RESUMO

Na Colômbia, em 1972, deu-se início a um processo inadequado de deposição de resíduos nas zonas urbanas da cidade de Medellín, denominado lixão de Moravia. No lixão de Medellín foram acumulados vários tipos de resíduos, entre hospitalares, industriais, domésticos e entulho, sem nenhum controle e com a autorização do governo local. Inicialmente, eram depositadas cerca de cem toneladas de lixo por dia, quantidade que ao longo dos anos aumentou significativamente. A evolução do acúmulo de lixo serviu para atrair a população local envolvida com atividades de reciclagem para a área do seu entorno. Em 1983, devido ao crescimento relevante, a montanha de lixo passou a ser encarada pelas entidades da administração pública locais como tópico de emergência para ações de saúde pública e solução de passivos ambientais gerais, sendo seu fechamento iminente. Essa dissertação se propõe estudar o transporte de contaminantes de três metais pesados: Cromo, Cádmiio e Chumbo. Para analisar o comportamento das multiespécies, foram realizados vários ensaios em amostras coletadas no Morro e para validar os resultados foram feitos ensaios in situ no Morro de Moravia. Inicialmente foram coletadas as amostras deformadas para realizar os ensaios de classificação, entre os quais, foram realizadas medidas de umidade, granulometria, limites de Atterberg e massa específica dos sólidos. Na caracterização geo-ambiental, foram realizados ensaios de sorção, medidas do pH e temperatura, além dos ensaios, em coluna a nível laboratorial e ensaios em coluna em escala real. Para complementar o estudo, foram realizados o levantamento topográfico do Morro, e instalados piezômetros e inclinômetros. As leituras destes instrumentos foram tomadas semanalmente durante dois meses. A partir dos resultados obtidos dos ensaios em laboratório e campo, foi possível verificar o comportamento dos três metais pesados analisados, fazendo uma comparação das curvas de chegada das concentrações, para os casos em que o afluente era água e no caso em que era lixiviado. O estudo revelou que o solo coletado apresenta alto teor de areia o que facilita o fluxo do lixiviado na direção do rio Medellín. Também foi observado tanto nos ensaios de laboratório como nas medidas de campo que o mecanismo de dessorção predominou no processo de fluxo. Ou seja, as concentrações finais medidas foram maiores que as iniciais, sendo surpreendentemente alta quando o fluido afluente era água. Isto significa que o solo está altamente contaminado, tornando-se um problema grave na época chuvosa já que toda esta contaminação é transportada para o rio Medellín, o maior afluente da cidade.

## **ABSTRACT**

In Colombia, in 1972, a process of inappropriate waste disposal has begun in urban areas of the city of Medellín, called Morro de Moravia. Various types of waste were accumulated, including hospital, industrial and domestic, with no control and with the permission of the local government. Initially, one hundred tons of waste, per day, was deposited approximately. This rate increased significantly among the years. The evolution of the accumulation of waste served to attract local people involved with recycling activities to the surroundings areas. In 1983, due to significant growth, the waste mountain came to be regarded by the authorities of the local public administration as a topic for emergency actions in public health. This dissertation proposes to study the transport of three heavy metals: Chromium, Cadmium and Lead. To analyze the behavior of multi-species, several tests were performed on samples collected at Morro and to validate the results, there were made in situ tests in Morro de Moravia. Initially, we collected disturbed samples to realize the test classification, measurements of moisture, particle size, Atterberg limits and bulk density of soils. Geo-environmental tests were performed like sorption, measurements of pH and temperature, in addition to the column tests at laboratory and in-situ. To complement the study, it was installed piezometers and inclinometers. The measurements of these instruments were taken weekly for two months. The results obtained in the laboratory and field tests were performed to verify the behavior of the three heavy metals analyzed. The study revealed that the collected soil has a high sand content which facilitates the flow of leachate toward the Medellín River. It was also observed both in laboratory tests and in field measurements that the predominant mechanism is the desorption process. Measurements of final concentrations were higher than the initials, when the fluid was water. This means that the soil is highly contaminated, becoming a serious problem in the rainy season for the Medellín city.

## RESUMEN

En Colombia, en 1972, se dio inicio a un proceso inadecuado de deposición de residuos en las zonas urbanas de la ciudad de Medellín, denominado basurero de Moravia. En el botadero de Medellín fueron acumulados varios tipos de residuos, entre hospitalarios, industriales, domésticos y escombros, sin ningún control y con la autorización del gobierno local. Inicialmente, eran depositadas cerca de cien toneladas de basura por día, cantidad que con los años aumentó significativamente. La evolución del morro de basura sirvió para atraer la población local envuelta con actividades de reciclaje al el área del entorno. En 1983, debido al crecimiento relevante, la montaña de basura pasó a ser tomada por las entidades de la administración pública como tópicos de emergencia para acciones de salud pública y solución de pasivos ambientales generales, declarando la clausurando inminente del morro. Esta disertación se propone estudiar el transporte de contaminantes de tres metales pesados: Cromo, Cadmio y Plomo. Para analizar el comportamiento del flujo de los metales multiespecie, fueron realizados varios ensayos en muestras colectadas en los alrededores del Morro y para validar los resultados fueron realizados ensayos en el Morro de Moravia “in situ”. Inicialmente fueron colectadas las muestras alteradas para realizar los ensayos de clasificación, entre los cuales, fueron realizados medidas de humedad, granulometría, límites de Atterberg y gravedad específica. En la caracterización geo-ambiental, fueron realizados ensayos de sorción, medidas del pH y temperatura, además de los ensayos, en columna a nivel laboratorial y ensayos en columna en escala real. Para complementar el estudio, fueron realizados el levantamiento topográfico del Morro, e instalados piezómetros e inclinómetros. Las lecturas de estos instrumentos fueron tomadas semanalmente durante dos meses. A partir de los resultados obtenidos de los ensayos en laboratorio y campo, fue posible verificar el comportamiento de los tres metales pesados analizados, haciendo una comparación de las curvas de llegada de las concentraciones, para los casos en que el afluente era agua y lixiviado. El estudio reveló que el suelo colectado presenta alto contenido de arena lo que facilita el flujo de lixiviado en la dirección del río Medellín. También fue observado tanto en los ensayos de laboratorio como en las medidas de campo que el mecanismo de desorción predominó en el proceso de flujo. O sea, las concentraciones finales medidas fueron mayores que las iniciales, siendo sorprendentemente alta cuando el fluido afluente era agua. Esto significa que el suelo está altamente contaminado, convirtiéndose un problema grave en la época lluviosa ya que toda esta contaminación es transportada para el río Medellín, el cual es el mayor afluente de la ciudad.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVAÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS	3
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1	INTRODUÇÃO	5
2.2	DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS	7
2.3	CONTAMINAÇÃO DO SOLO E FONTES DE ÁGUA PELA DECOMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS	9
2.4	ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	9
2.5	LIXIVIADO	10
2.5.1	Cádmio	11
2.5.2	Cromo	12
2.5.3	Chumbo	12
2.6	MECANISMOS DE TRANSPORTE DE POLUENTES NO SOLO E NA ÁGUA	13
2.6.1	Mecanismo de Advecção	13
2.6.2	Mecanismo de Dispersão Hidrodinâmica	15
2.6.2.1	Difusão Molecular ( $D^*$ )	15
2.6.2.2	Dispersão Mecânica	17
2.6.3	Mecanismo de Sorção	18
2.6.3.1	Isoterma Linear ( $c$ versus $S$ )	19
2.6.3.2	Isoterma de Freundlich	20
2.6.3.3	Isoterma de Langmuir ( $1/c$ versus $1/S$ )	21
2.6.4	Precipitação	22
2.6.5	Oxidação e redução	22
2.6.6	Biodegradação	22
2.6.7	Decaimento Radioativo ( $\lambda$ )	22
2.7	MODELO MATEMÁTICO DO TRANSPORTE DE CONTAMINANTES	23
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>25</b>
3.1	ENSAIOS DE LABORATÓRIO	25

3.1.1	Descrição do local da coleta.....	25
3.1.2	Coleta do Solo e Preparação do Ensaio.....	27
3.1.3	Umidade (w).....	27
3.1.4	Granulometria com peneiramento e sedimentação .....	28
3.1.5	Massa específica dos grãos do solo ( $\rho_s$ ).....	29
3.1.6	Limites de Atterberg.....	30
3.1.7	Peso específico natural ( $\gamma_n$ ).....	30
3.1.8	Índice de vazios (e).....	31
3.1.9	Porosidade (n).....	31
3.1.10	Ensaio de Permeabilidade.....	31
3.1.11	Descrição dos Fluidos .....	32
3.1.12	Análise Química.....	32
3.1.13	Ensaio em Coluna.....	33
3.1.14	Ensaio de Sorção .....	34
3.2	TRABALHO DE CAMPO.....	36
3.2.1	Levantamento topográfico.....	36
3.2.2	Instrumentação geotécnica .....	37
3.2.2.1	Inclinometria.....	38
3.2.2.2	Piezometria .....	39
3.2.3	Ensaio de campo.....	40
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>45</b>
4.1	ENSAIOS DE LABORATÓRIO .....	45
4.1.1	Amostra M1.....	45
4.1.1.1	Classificação.....	45
4.1.1.2	Ensaio em Coluna.....	48
4.1.2	Amostra M2.....	52
4.1.2.1	Classificação.....	52
4.1.2.2	Ensaio em Coluna.....	54
4.1.3	Amostra M3.....	58
4.1.3.1	Classificação.....	58
4.1.3.2	Ensaio em Coluna.....	60
4.1.4	Amostra M4.....	63
4.1.4.1	Classificação.....	63

4.1.4.2	Ensaio em Coluna.....	66
4.1.5	Amostra M5.....	69
4.1.5.1	Classificação.....	69
4.1.5.2	Ensaio em Coluna.....	71
4.1.6	Comparação das amostras em água e lixiviado para cada metal a partir do ensaio em coluna.....	75
4.1.7	Ensaio de Sorção.....	79
4.2	TRABALHO DE CAMPO.....	79
4.2.1	Levantamento topográfico.....	79
4.2.2	Instrumentação.....	80
4.2.2.1	Inclinometria.....	80
4.2.2.2	Piezometria.....	80
4.2.3	Ensaio de campo.....	81
4.2.3.1	Montagem 1.....	81
4.2.3.2	Montagem 2.....	84
4.2.3.3	Análise química das amostras coletadas.....	87
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>91</b>
5.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	92
<b>A 1</b>	<b>ENSAIO DE SORÇÃO.....</b>	<b>98</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Localização do Valle do Aburrá (modificada, de IEI 2009).....	2
Figura 2.1 – Lixão no Morro do Bumba em 1977 (Rio de Janeiro-Brasil).....	8
Figura 2.2 – Lixão no Morro de Moravia (Medellín-Colômbia). ....	9
Figura 2.3 – Representação esquemática do processo de espalhamento causado pela dispersão, modificada de Vargas (2001). ....	15
Figura 2.4 – Distribuição das velocidades (modificada Freeze & Cherry,1979). ....	17
Figura 2.5 – Isoterma linear (Rowe et al, 1995).....	20
Figura 2.6 – Representação gráfica para determinação dos parâmetros (Rowe et. al., 1995). 21	
Figura 2.7 – Isoterma de Langmuir (Rowe et. al., 1995). ....	21
Figura 2.8 – Distribuição da concentração inicial (Ozelim & Cavalcante, 2013).....	24
Figura 3.1 – (a) consistência do material coletado, (b) taludes verticais formados por plásticos no Morro e (c) Altura do talude. ....	26
Figura 3.2 – Local de amostras coletadas à margem direita do Rio Medellín. ....	26
Figura 3.3 – Procedimentos do ensaio de granulometria, (a) amostra deformada, (b) lavagem na peneira N <sup>o</sup> 200 e (c) peneiramento. ....	28
Figura 3.4 – Ensaio massa específica dos grãos.....	29
Figura 3.5 – Ensaio de limites de liquidez e limite plástico, em (a) ensaio de penetrômetro de cone, (b) aparelho de casagrande e (c) limite de plasticidade.....	30
Figura 3.6 – Detalhe do reservatório e o piezômetro. ....	31
Figura 3.7 – Procedimento para extração do lixiviado: (a) Drenos horizontais; (b) Perfuração manual; (c) Tanques de armazenamento.....	32
Figura 3.8 – Ensaio em coluna, em (a) equipamento para o ensaio, (b) reservatório, (c) válvulas e (d) amostras indeformadas. ....	34
Figura 3.9 – Ensaio de sorção, em (a) passagem do solo, (b) adição da água destilada, (c) medição do pH, (d) amostras de sorção, (e) mesa vibratória, (f) centrifuga, (g) adição do nítrico (HNO <sub>3</sub> ).....	35
Figura 3.10 – Trabalhos topográficos realizados no Morro em 2012 (a) setor oriental do Morro, (b) casas dos moradores, (c) setor sul do Morro. ....	37
Figura 3.11 – Estado dos equipamentos instalados no ano 2009, (a) piezômetro dois sem tampa, (b) destruição da caixa de protecção, (c) instrumento entupido, (d) tubo quebrado. ....	38

Figura 3.12 – Procedimento de perfuração e instalação do inclinômetro INC-03 em 2012, (a) revestimento da perfuração, (b) inserção do tubo, (c) encaixe da tubulação, (d) procurando o nível do lençol freático.....	38
Figura 3.13 – Esquema do piezômetro de corda vibrante instalado, modificada de Geodataandina, (2008). .....	39
Figura 3.14 – Perfuração e instalação do inclinômetro INC-03 no ano 2012, em (a) equipamento, (b) perfuração com água, (c) piezômetro, (d) instalação do piezômetro. (e) adição de bentonita .....	41
Figura 3.15 – Localização dos equipamentos (Google Earth 2011 - sem escala).....	41
Figura 3.16 – Localização do campo experimental.....	42
Figura 3.17 – Esquema dos montagens (nos poços com círculos azuis nunca teve fluido)....	43
Figura 3.18 – Reservatório e poços de observação, (a) campo experimental, (b) reservatório, (c) poço de observação.....	43
Figura 3.19 – Ensaio em campo, (a) preenchimento do reservatório, (b) reservatório, (c) geotêxtil para proteger as perfurações no fundo de reservatório, (d),(e),(f),(g) poços de observação com amostras coletadas.....	44
Figura 4.1 – Curva granulométrica da amostra M1 com defloculante.....	46
Figura 4.2 – Limite de liquidez da amostra M1. ....	47
Figura 4.3 – Curvas de transporte com água como afluente da amostra M1. ....	49
Figura 4.4 – Curvas de transporte com lixiviado como afluente da amostra M1. ....	50
Figura 4.5 – Curvas de transporte (a) Cádmio, (b) Chumbo, (c) Cromo em lixiviado e em água da amostra M1.....	51
Figura 4.6 – Curva granulométrica do solo da amostra M2.....	53
Figura 4.7 – Limite de liquidez da amostra M2. ....	53
Figura 4.8 – Curvas de transporte com água como afluente da amostra M2. ....	55
Figura 4.9 – Curvas de transporte com lixiviado como afluente da amostra M2. ....	56
Figura 4.10 – Curvas de transporte (a) Cádmio, (b) Chumbo, (c) Cromo em lixiviado e em água da amostra M2. ....	57
Figura 4.11 – Curva granulométrica do solo da amostra M3.....	59
Figura 4.12 – Limite de liquidez da amostra M3. ....	59
Figura 4.13 – Curvas de transporte com água como afluente da amostra M3. ....	61
Figura 4.14 – Curvas de transporte com lixiviado como afluente da amostra M3. ....	62
Figura 4.15 – Curvas de transporte (a) Cádmio, (b) Chumbo, (c) Cromo em lixiviado e em água da amostra M3. ....	63

Figura 4.16 – Curva granulométrica do solo da amostra M4.....	64
Figura 4.17 – Limite de liquidez da amostra M4. ....	65
Figura 4.18 – Curvas de transporte com água como afluente da amostra M4. ....	67
Figura 4.19 – Curvas de transporte com lixiviado como afluente da amostra M4. ....	68
Figura 4.20 – Curvas de transporte (a) Cádmio, (b) Chumbo, (c) Cromo em lixiviado e em água da amostra M4. ....	68
Figura 4.21 – Curva granulométrica do solo da amostra M5.....	70
Figura 4.22 – Limite de liquidez da amostra M5. ....	70
Figura 4.23 – Curvas de transporte com água como afluente da amostra M5. ....	72
Figura 4.24 – Curvas de transporte com lixiviado como afluente da amostra M5. ....	73
Figura 4.25 – Curvas de transporte Cádmio, Chumbo, Cromo em lixiviado e em água da amostra M5.....	74
Figura 4.26 – Curvas típicas características de transporte expressas em termos de concentração relativa $C/C_0$ x número do volume de poros (modificado de Sousa, 2004). .....	75
Figura 4.27 – Curvas de transporte de Cádmio com água como afluente para as cinco amostras.....	76
Figura 4.28 – Curvas de transporte de Cádmio com lixiviado como afluente para as cinco amostras.....	76
Figura 4.29 – Curvas de transporte de Chumbo com água como afluente para as cinco amostras.....	77
Figura 4.30 – Curvas de transporte de Chumbo com lixiviado como afluente para as cinco amostras.....	77
Figura 4.31 – Curvas de transporte de Cromo com água como afluente para as cinco amostras. .....	78
Figura 4.32 – Curvas de transporte de Cromo com lixiviado como afluente para as cinco amostras.....	78
Figura 4.33 – Levantamento topográfico do Morro de Moravia, 2011.....	79
Figura 4.34 – Curvas de transporte Cádmio, Chumbo, Cromo em (a) P1 e (b) P2.....	82
Figura 4.35 – Curvas de transporte Cádmio, Chumbo, Cromo em (a) P6 e (b) P7.....	82
Figura 4.36 – Curvas de transporte Cádmio, Chumbo, Cromo em (a) P8 e (b) P9.....	83
Figura 4.37 – Curvas de transporte Cádmio, Chumbo, Cromo em (a) P10 e (b) P11.....	83
Figura 4.38 – Curvas de transporte Cádmio, Chumbo, Cromo em P12.....	84
Figura 4.39 – Curvas de transporte Cádmio, Chumbo, Cromo em (a) P1 e (b) P2.....	84

Figura 4.40 – Curvas de transporte Cádmio, Chumbo, Cromo em (a) P3 e (b) P4.....	85
Figura 4.41 – Curvas de transporte Cádmio, Chumbo, Cromo em (a) P7 e (b) P8.....	85
Figura 4.42 – Curvas de transporte Cádmio, Chumbo, Cromo em (a) P9 e (b) P10.....	86
Figura 4.43 – Curvas de transporte Cádmio, Chumbo, Cromo em P11.....	86
Figura 4.44 – Calibração para Pb utilizando como maior padrão 2 ppm. ....	88
Figura 4.45 – Calibração para Cd utilizando como maior padrão 2 ppm. ....	89
Figura 4.46 – Calibração para Cr utilizando como maior padrão 2ppm .....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Atividades geradoras de resíduos sólidos na América Latina, modificada de UPS (2012).	6
Tabela 3.1 – Relação das classes texturais segundo a ABNT e ASTM.	28
Tabela 3.2 – Calibração do piezômetro de Moravia 2012.	40
Tabela 3.3 – Profundidades dos poços de observação	44
Tabela 4.1 – Dados do ensaio granulométrico da amostra M1.	46
Tabela 4.2 – Dados do ensaio de limite de liquidez da amostra M1.	47
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de classificação da amostra M1.	47
Tabela 4.4 – Dados do corpo de prova da amostra M1.	48
Tabela 4.5 – Parâmetros do corpo de prova da amostra M1.	48
Tabela 4.6 – Concentrações de Cádmio <sup>+2</sup> , Chumbo <sup>+2</sup> e Cromo <sup>+3</sup> com água como afluente na amostra M1.	49
Tabela 4.7 – Concentrações de Cromo, Cádmio e Chumbo e com lixiviado como afluente na amostra M1.	50
Tabela 4.8 – Dados do ensaio granulométrico da amostra M2.	52
Tabela 4.9 – Dados do ensaio de limites de liquidez da amostra M2.	53
Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios de classificação da amostra M2.	54
Tabela 4.11 – Dados do corpo de prova da amostra M2.	54
Tabela 4.12 – Parâmetros do corpo de prova da amostra M2.	55
Tabela 4.13 – Concentrações de Cádmio, Chumbo e Cromo com água como afluente na amostra M2.	55
Tabela 4.14 – Concentrações de Cádmio, Chumbo e Cromo com lixiviado como afluente na amostra M2.	56
Tabela 4.15 – Dados do ensaio granulométrico da amostra M3.	58
Tabela 4.16 – Dados do ensaio de limites de liquidez da amostra M3.	59
Tabela 4.17 – Resultados dos ensaios de classificação da amostra M3.	60
Tabela 4.18 – Dados do corpo de prova da amostra M3.	60
Tabela 4.19 – Parâmetros do corpo de prova da amostra M3.	60
Tabela 4.20 – Concentrações de Cádmio, Chumbo e Cromo com água como afluente na amostra M3.	61

Tabela 4.21 – Concentrações de Cádmio, Chumbo e Cromo com lixiviado como afluente na amostra M3.....	62
Tabela 4.22 – Dados do ensaio granulométrico da amostra M4. ....	64
Tabela 4.23 – Dados do ensaio de limites de liquidez da amostra M4. ....	65
Tabela 4.24 – Resultados dos ensaios de classificação da amostra M4. ....	65
Tabela 4.25 – Dados do corpo de prova da amostra M4.....	66
Tabela 4.26 – Parâmetros do corpo de prova da amostra M4.....	66
Tabela 4.27 – Concentrações de Cádmio, Chumbo e Cromo com água como afluente na amostra M4.....	67
Tabela 4.28 – Concentrações de Cádmio, Chumbo e Cromo com lixiviado como afluente na amostra M4.....	67
Tabela 4.29 – Dados do ensaio granulométrico da amostra M5. ....	69
Tabela 4.30 – Dados do ensaio de limites de liquidez da amostra M5. ....	70
Tabela 4.31 – Resultados dos ensaios de classificação da amostra M5. ....	71
Tabela 4.32 – Dados do corpo de prova da amostra M5.....	71
Tabela 4.33 – Parâmetros do corpo de prova da amostra M5. ....	72
Tabela 4.34 – Concentrações de Cádmio, Chumbo e Cromo com água como afluente na amostra M5.....	72
Tabela 4.35 – Concentrações de Cádmio, Chumbo e Cromo com lixiviado como afluente na amostra M5.....	73
Tabela 4.36 – Resumo das leituras realizadas no inclinômetro INC-03. ....	80
Tabela 4.37 – Resultados das leituras realizadas nos piezômetros de Moravia 2012. ....	81
Tabela 4.38 – Dados de calibração do Pb. ....	88
Tabela 4.39 – Dados de calibração do Cd. ....	88
Tabela 4.40 – Dados de calibração do Cd. ....	89
Tabela A.1 – Concentrações de Cádmio na amostra M1 .....	98
Tabela 2 – Concentrações de Cádmio na amostra M2 .....	98
Tabela 3 – Concentrações de Cádmio na amostra M3 .....	99
Tabela 4 – Concentrações de Cádmio na amostra M4 .....	99
Tabela 5 – Concentrações de Chumbo na amostra M1 .....	99
Tabela 6 – Concentrações de Chumbo na amostra M2 .....	99
Tabela 7 – Concentrações de Chumbo na amostra M3 .....	100
Tabela 8 – Concentrações de Chumbo na amostra M4 .....	100
Tabela 9 – Concentrações de Cromo na amostra M1 .....	101

Tabela 10 – Concentrações de Cromo na amostra M2.....	101
Tabela 11 – Concentrações de Cromo na amostra M3.....	101
Tabela 12 – Concentrações de Cromo na amostra M4.....	101

# LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

## ABREVIATURAS:

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BET	<i>Batch Equilibrium Test</i>
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CTC	Capacidade de troca catiónica
<i>et al.</i>	E outros
GDCON	Grupo de diagnóstico y control de la contaminación
IEI	Instituto de Estudios de Infraestructura
INC-03	Inclinômetro três
NBR	Norma Brasileira de Regulamentação
ONU	Organização das Nações Unidas
PZ	Piezômetro
SUCS	Sistema de Classificação Unificada dos Solos
UnB	Universidade de Brasília
USEPA ou EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>

## SIMBOLOS:

### Letras Arábicas

A	Leitura inclinômetro, direção perpendicular às curvas de nível
<i>b</i>	Taxa cinética constante de saída e de entrada de constituintes nos locais de sorção [ $L^3/M$ ]
B	Leitura inclinômetro, direção perpendicular a A
C	Concentração volumétrica do soluto [ $M/L^3$ ]
Cd	Cádmio
<i>c<sub>eq</sub></i>	Concentração de equilíbrio da solução [ $M/L^3$ ]
Cr	Cromo
<i>c(x,y,z,t)</i>	Concentração do soluto [ $M/L^3$ ]
<i>c</i>	Concentração do soluto na fase inicial
cm	Centímetro
cm/s	Centímetro por segundo
D	Coeficiente de difusão molecular em solução aquosa livre

$D$	Diâmetro do corpo de prova
$D^*$	Coefficiente de difusão molecular em meio poroso
$D_h$	Coefficiente de dispersão hidrodinâmica
$D_m$	Dispersão mecânica
$D_x, D_y$ e $D_z$	Coefficientes de difusão [ $L^2/T$ ]
$\bar{D}$	Tensor de dispersão hidrodinâmica [ $L^2/T$ ]
$\partial c/\partial x, \partial c/\partial y$ e $\partial c/\partial z$	Gradientes de concentração [ $M/L^3/L$ ]
$e$	Índice de vazios
$\text{erf}(x)$	Função erro
$F_x, F_y$ e $F_z$	fluxos difusivos de soluto por unidade de área e por unidade de tempo [ $M/T$ ]
$g$	Grama
$g$	Gravidade
$G_s$	Massa específica real dos grãos relativa da água
$H$	Altura
$HNO_3$	Ácido nítrico
$i$	Gradiente hidráulico [ $L/L$ , adimensional]
$IP$	Índice de plasticidade
$K$	Coefficiente de partição de Freundlich
$K$	Coefficiente de permeabilidade
$k$	coeficiente de condutividade hidráulica que depende do meio poroso e do fluido [ $L/T$ ]
$\vec{k}$	Tensor de condutividade hidráulica para o meio [ $L/T$ ]
$K_d$	Coefficiente de distribuição ou adsorção [ $L^3/M$ ]
$K_f$	Constante proporcional à capacidade de adsorção
$K_y$	Coefficiente de permeabilidade hidráulica na direção $y$
$l$	Distância em uma escala macroscópica definida pela trajetória reta entre dois pontos de uma linha de fluxo
$l_e$	Distância real em uma escala microscópica, efetiva de transporte entre esses dois pontos
$LL$	Limite de liquidez
$LC$	Limite de contração
$LP$	Limite de plasticidade

$\log K$	Intercepto no eixo das ordenadas
m	Metro
$M_{cp+cil}$	Massa do corpo de prova mais a massa do cilindro [g]
$M_{cil}$	Massa do cilindro [g]
$M_{cp}$	Massa do corpo de prova [g ]
$M_s$	Massa de sólidos [g]
$M_w$	Massa da água [g]
m/s	Metros por segundo
$m^2/g$	Metros quadrados por grama
$m^3$	Metro cúbico
$m^3/dia$	Metro cúbico por dia
$mg.kg^{-1}$	Miligramas por quilo
mg/l	Miligramas por litro
ml	Mililitro
mm	Milímetro
$n$	Porosidade do solo [adimensional]
N	Coefficiente exponencial de Freundlich
$N$	Coefficiente angular da reta obtida
Nº	Número
Pb	Chumbo
pH	Potencial hidrogeniônico
PPM	Partes por milhão
Q	Vazão de água que passa pela seção de área A
$Q_s$	Fonte geral para a produção ou a perda de soluto no sistema
R	Fator de retardamento
S	Massa do soluto adsorvida [M/M]
$S_m$	Máxima concentração específica de soluto sorvido
$1/S_m b$	Coefficiente angular
$1/S_m$	Intercepto da reta no eixo das ordenadas
$t$	Tempo [T]
$u(x)$	função Heaviside
$V_{cp}$	Volume do corpo de prova [cm <sup>3</sup> ]
$\bar{v}_y$	Velocidade linear média do solvente
$V_L$	Velocidade linear média longitudinal [L/T].

$\bar{v}$	Velocidade média do fluido intersticial [L/T]
V	Volume
$V_0$	Volume inicial
$v_x, v_y, v_z$	Velocidades advectivas [L/T]
$V_y$	Velocidade de percolação [L/T]
W	Umidade [%]
x	Argumento da função erro
x, y, z	Direções do fluxo no sistema cartesiano adotado [L]
(x,y,z)	Ponto onde se quer analisar a concentração
x	Distância

### Letras Gregas

$\frac{dh}{dy}$	Gradiente hidráulico
$\frac{\partial C}{\partial t}$	Gradiente de concentração no tempo [M/L <sup>3</sup> ]
$\frac{\partial C}{\partial y}$	Gradiente de concentração no espaço
$\Delta H$	Diferença da carga hidráulica entre dois pontos de uma coluna de solo [L]
$\Delta H/\Delta L$	Gradiente hidráulico ( <i>i</i> ) [L/L, adimensional]
$\Delta L$	Comprimento por onde passam as linhas de fluxo [L]
$\theta_w$	Teor de umidade volumétrica do solo [L <sup>3</sup> /L <sup>3</sup> ]
$\theta_{ws}$	Conteúdo volumétrico de água no caminho solo+água
$\frac{d\Psi}{dz}$	Gradiente hidráulico para o caso não saturado
$\mu$	Viscosidade do fluido
$\mu\text{m}$	Micro-metro
$\alpha$	Constante empírica para o cálculo da EC
$\alpha_L$	Coefficiente de dispersividade na direção longitudinal ao fluxo [L]
$\beta$	Tangente da curva experimental $C/C_0 \times V/V_v$
$\varepsilon$	Declividade da curva de sorção com o aumento da concentração de equilíbrio
$\rho_w$	Densidade do fluido
$\lambda$	Meia vida dos nuclídeos radioativos [1/T]
$\vec{\nabla}$	Operador gradiente

$\vec{\nabla}h$	Gradiente hidráulico [adimensional].
$\tau$	Tortuosidade
$v$	Velocidade do fluxo, Velocidade Linear Média, ou velocidade de Infiltração
$\rho_d$	Massa específica seca do solo [M/L <sup>3</sup> ]
$\mu\text{g.L}^{-1}$	Microgramas por litro

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 MOTIVAÇÃO

A contaminação das águas subterrâneas devido à infiltração de contaminantes no solo é um dos problemas de saúde pública que mais afeta a população mundial, emergindo como uma das principais preocupações das nações na atualidade. A ação confiável, rápida e rentável na detecção e reparo pode contribuir para minimização dos impactos adversos que este fenômeno gera, desde o ponto de vista ambiental até o econômico (Woldt, 1990).

O armazenamento dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários, construídos segundo critérios de engenharia e normas operacionais específicas visa o confinamento seguro, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública. Esta é uma alternativa para minimizar o problema de contaminação do solo e das águas pela infiltração de lixiviado no subsolo. Mesmo nestas condições, Boscov (1997) ressalta que não existe uma alternativa para disposição de resíduos totalmente impermeável. Mesmo que a concentração inicial do poluente sobre a superfície do terreno seja pequena, o lençol freático possivelmente será atingido com concentração não nula. Este problema é, consideravelmente, aumentado quando não há um projeto geo-ambiental, anterior ao processo de deposição do lixo.

Na Colômbia, em 1972, deu-se início a um processo inadequado de deposição de resíduos nas zonas urbanas da cidade de Medellín, no Valle de Aburrá. O Valle de Aburrá localiza-se na bacia hidrográfica do Rio Medellín, com comprimento aproximado de 60 km, topografia e inclinação irregular, variando de 1.300 m a 2.800 m acima do nível do mar (Cano *et al.*, 2001).

Este processo se realizou na forma de lixão, em uma zona conhecida como Moravia, localizada na encosta nordeste da cidade próxima à margem oriental do Rio Medellín, a cerca de dois quilômetros do centro da cidade. Em Moravia, foram acumulados vários tipos de resíduos, entre hospitalares, industriais, domésticos e entulho, sem nenhum controle e com a anuência do governo local. Inicialmente, eram depositadas cerca de cem toneladas de lixo diariamente, quantidade que ao longo dos anos aumentou significativamente. A evolução do acúmulo de lixo serviu para atrair a população local envolvida com atividades de reciclagem

para área do seu entorno. Em 1983, devido ao crescimento descontrolado, a montanha de lixo passou a ser encarada pelas entidades da administração pública locais como tópico de emergência para ações em saúde pública e solução de passivos ambientais gerais, sendo seu fechamento iminente. Entre 1999 e 2005, a Área Metropolitana do Valle do Aburrá, entidade encarregada da gestão ambiental e dos resíduos sólidos locais do Valle de Aburrá, encomendou estudos biológicos que constatarem níveis de contaminação superiores aos limites admissíveis pelos órgãos ambientais locais na área e entorno do lixão, para gases como sulfeto de hidrogênio, cianeto de hidrogênio e metano, metais pesados como Cádmio, Cromo e Chumbo. Também foram identificados compostos aromáticos como benzeno, tolueno, xileno e fenóis, Na Figura 1.1 apresentam-se a localização do Morro de Moravia e sua topografia modificada do *Instituto de Estudios de Infraestructura* (IEI, 2009).

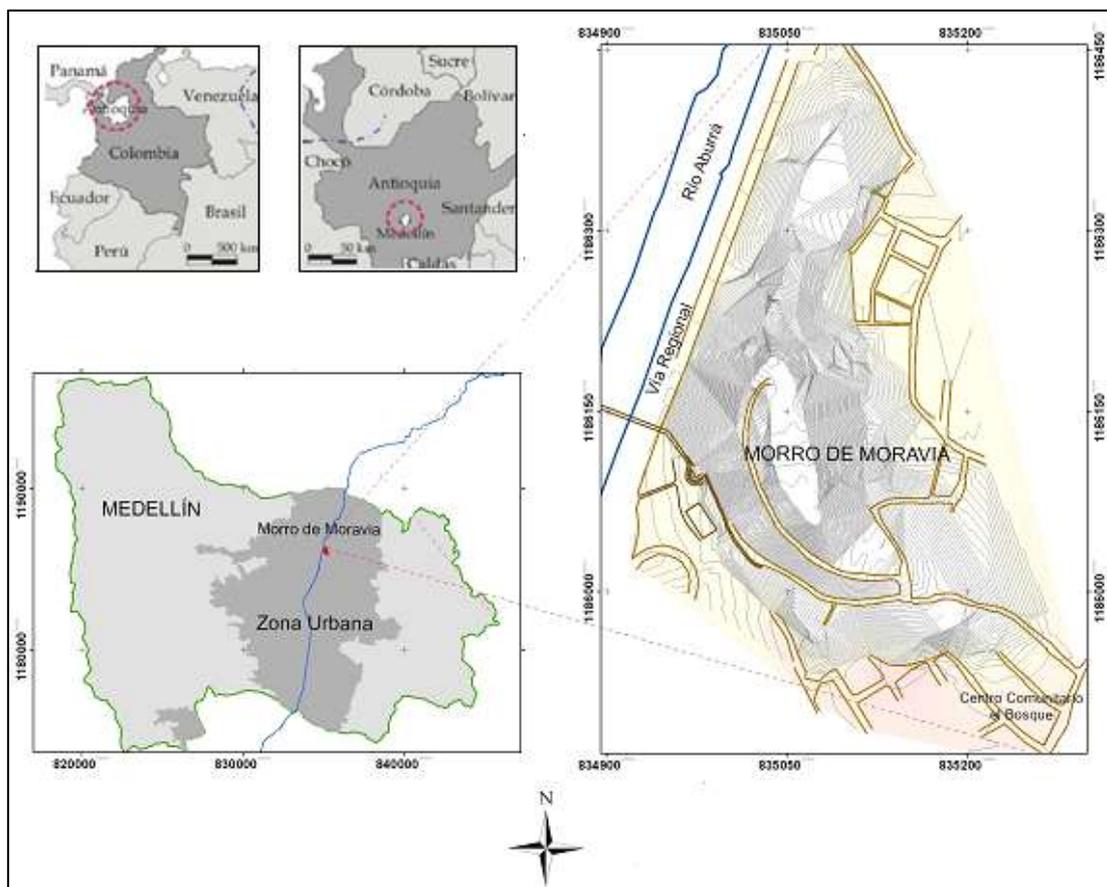


Figura 1.1 – Localização do Valle do Aburrá (modificada, de IEI 2009).

No ano 2004, após a construção de residências localizadas em áreas de alta exposição à contaminação, as autoridades municipais solicitaram uma série de estudos preliminares para avaliar o nível de poluição e decidir quais poderiam ser as medidas mais adequadas para a

restauração da área afetada. Em um estudo mais detalhado (IEI, 2009), foram identificados os metais pesados:  $Hg^{2+}$  (Mercúrio),  $Pb^{4+}$  (Chumbo),  $Cr^{3+}$  (Cromo),  $Cd^{2+}$  (Cádmio) e  $Ni^{4+}$  (Níquel), na matriz de resíduo local, além da presença de matéria orgânica. Também foram detectados altos níveis destes metais pesados em algumas amostras (de solos e tecidos vegetais) coletadas no depósito de lixo de Moravia.

Por ser tecnicamente irregular, o depósito de lixo de Moravia não possui um sistema de drenagem ou um sistema para tratamento de lixiviados. Dados estatísticos de 2008, levantados pela entidade Área Metropolitana do Valle do Aburrá, relatam que o depósito de lixo produz um total de efluente de lixiviado da ordem de  $1,78 \text{ m}^3/\text{dia}$ .

Por todas estas razões, essa dissertação fundamenta-se no estudo do comportamento do fluxo de solutos inorgânicos em direção ao Rio Medellín, analisando os três principais metais pesados presentes no lixiviado e que podem estar sorvidos no solo.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta dissertação é compreender o efeito da interação multiespécie no padrão de contaminação que percola em direção ao rio Medellín (Colômbia), por meio da caracterização geotécnica e laboratorial. O lixiviado produzido no lixão de Moravia possui em sua composição contaminantes inorgânicos, tais como, Cádmio, Cromo e Chumbo.

Para isso, alguns objetivos específicos serão realizados:

- ❖ Realização de furos de sondagem para coletas de amostras deformadas e indeformadas para realização dos ensaios laboratoriais.
- ❖ Caracterização geotécnica do solo coletado para realização de ensaios de umidade, ensaios de granulometria, ensaios de limites de Atteberg e ensaios de massa específica do solo.
- ❖ Caracterização ambiental laboratorial do solo coletado para realização de ensaios em coluna, ensaios de sorção, ensaios de pH e medidas de temperatura.
- ❖ Realização de trabalhos geotécnicos na zona em estudo, para realização de medidas topográficas, ensaios de piezometria, ensaios de inclinometria.
- ❖ Realização de ensaios em colunas de grandes dimensões na zona em estudo.

- ❖ Comparação das curvas de chegada das concentrações dos três metais pesados (Cromo, Cádmio e Chumbo) obtidos em laboratório e no campo, para os casos em que o afluente é água e lixiviado.
- ❖ Verificação do conflito multiespécie dos três metais (Cromo, Cádmio e Chumbo), ensaiados anteriormente.

### **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Essa dissertação foi estruturada em cinco capítulos.

No Capítulo 1, apresenta-se como motivação, o caso de Moravia, o maior lixão da cidade de Medellín, e os problemas que o lixão gera ao Rio Medellín principal fonte da água da região. Também são apresentados os objetivos propostos para a pesquisa que busca conhecer o comportamento do fluxo do lençol freático no Morro.

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica, onde se explica alguns conceitos sobre resíduos sólidos, mecanismos de transporte de contaminantes em meios porosos e ensaios de laboratório e de campo que foram feitos e o modelo usado para representar a dinâmica do fluxo no Morro.

No Capítulo 3, são descritas as metodologias utilizadas na campanha de sondagens, nos ensaios de laboratório e nos ensaios de campo.

No Capítulo 4, foram apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de laboratório como caracterização física e química e ensaios de coluna e os ensaios feitos em campo.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho realizado e as propostas para pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 INTRODUÇÃO

No campo ambiental, os lixões têm sido uma das maiores preocupação durante as últimas décadas para a humanidade, porque eles trazem uma série de consequências prejudiciais para a saúde.

Os resíduos sólidos (RS) são o resultado das atividades domésticas, comerciais, industriais e de mercado. A gestão de resíduos sólidos, especialmente em relação com a disposição final, é uma tarefa complexa e tornou-se um problema comum para todos os países. Isto pode ser evidenciado pelo aumento de descargas de resíduos sólidos em fontes de água ou no abandono em locais inadequados formando lixões a céu aberto.

O problema dos RS agrava-se devido à aceleração do crescimento populacional, da concentração em áreas urbanas, do desenvolvimento industrial e mudanças nos hábitos de consumo. Tudo isto contribuem para o aumento na quantidade de resíduos sólidos, incrementando a contaminação dos recursos naturais e a deterioração da qualidade de vida das pessoas. Na Tabela 2.1 apresenta-se a percentagem de resíduos sólidos gerados na América Latina (UPS, 2012).

Para promover melhorias no processo de gestão de resíduos sólidos, é necessário o adequado conhecimento de técnicas de disposição dos resíduos sólidos, considerando os variados tipos de alternativas de disposição final bem como técnicas de tratamento de resíduos sólidos, ponderando sempre os diferenciados condicionantes de projetos em diferentes conjunturas para aplicação de tais alternativas técnicas possam ser empregadas.

Um exemplo de alternativa de disposição final inadequada e, ainda muito utilizada dá-se pela simples deposição dos resíduos sólidos urbanos em terrenos, geralmente baldios, constituindo-se os conhecidos lixões, onde os resíduos são descartados, sem nenhum tipo de impermeabilização do solo, não atendendo as normas de controle. Segundo Sabetai Calderoni (2012), os lixões recebem resíduos jogados de qualquer maneira, e como não há gestão ou

monitoramento do acúmulo destes resíduos, as pilhas de lixo tendem ao desmoronamento ao longo dos anos, enquanto ocorre degradação do material depositado e movimentações nas pilhas de lixo.

Outra alternativa trata-se do aterro controlado, normalmente definido como um lixão “remediado”, recebendo cobertura de camadas de terra, e depois executado em camadas sucessivas de terra e lixo, mas sem procedimentos de impermeabilização do solo.

Outra alternativa de disposição final de resíduos sólidos trata-se do aterro sanitário, onde o depósito de lixo obedece a uma série de normas e procedimentos a fim de minimizar o impacto sobre o meio ambiente. Nesses sistemas, o lixo é disposto sobre camadas de solo compactadas e recoberto com solo local (UPS, 2012).

Tabela 2.1– Atividades geradoras de resíduos sólidos na América Latina, modificada de UPS (2012).

<b>Atividades geradoras</b>	<b>Componentes</b>	<b>% total de RS</b>
Residência e domicílios.	Resíduos de cozinha, papel e papelão, plásticos, vidros, metais, têxteis, resíduos de jardim, solo.	50 - 75
Comercial, escritórios, restaurantes, hotéis, armazéns, mercados.	Papel, papelão, plásticos, madeira, resíduos, alimentar, vidro, metais, resíduos especiais e perigosos.	10 - 20
Institucional, públicas, escolas, universidades e serviços públicos, repartições, faculdades e serviços públicos.	Similar ao comercial.	5 - 15
Indústria (pequenas indústrias) manufatura de roupa, sapatos, alfaiates, carpinteiros.	Resíduo do processo industrial, materiais de sucata, inclui resíduos, alimentar, cinzas, demolição e construção, especiais e perigosos.	5 - 30
Ruas e áreas públicas.	Os resíduos jogados por pedestres, sujeira, folhas, estrume.	10 - 20

Com a técnica do aterro sanitário, os resíduos são isolados do ambiente e conformados em câmaras, também denominadas células de disposição. Nessas câmaras, são interrompidas as

atividades aeróbias devido ao esgotamento do oxigênio. Inicia-se, assim, o processo de biodegradação anaeróbia cujo produto é a liberação de gás e produção de lixiviado.

O lixiviado acumula-se no fundo das valas de disposição e tende a se infiltrar no solo, podendo alcançar o lençol freático ou os aquíferos mais superficiais. A contaminação ocorrerá no caso em que o aterro sanitário não esteja separado por uma camada de solo ou revestimentos de baixa permeabilidade (Braga *et al.*, 2005).

O lixiviado pode contaminar as águas subsuperficiais, uma vez que pode alcançar diretamente os aquíferos ou infiltrar-se através da zona não saturada e atingir o lençol freático. Este processo depende basicamente dos aspectos geológicos e geotécnicos do meio. No entanto, diversos processos físico-químicos e biológicos ocorrem na interação água-poluinte-solo, os quais devem ser analisados, evitando interpretações equivocadas (Bear, 2010).

## **2.2 DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS**

Entre as principais regras para a construção de um aterro são: adoção da distância de no mínimo 100 metros entre a área construída e os cursos de água; impermeabilização do solo com uma camada de manta sintética, pedra e areia, alternância de lixo compactado com uma camada de argila, sempre terminando em grama, construção em desnível, drenagem de gás metano e lixiviado, tratamento adequado de todos os dejetos, adoção de vida útil de 20 anos.

Mundialmente, a opção adotada para disposição de resíduos trata-se do aterro sanitário. Entretanto, devido à escassez de espaços para disposição de resíduos, alguns países da Europa como Espanha, Alemanha, França e Grécia têm investido em ações para estimular a reciclagem como um modo de aliviar os aterros, diminuindo a quantidade de lixo depositada regularmente nesses. A cidade de Barcelona, localizada na Espanha, é um exemplo da iniciativa de reciclagem mencionada. Em 1997, entrou em vigor uma lei determinando que todas as empresas reciclassem as embalagens de seus produtos. Assim, no valor de qualquer produto comercializado, que possui na embalagem o símbolo chamado ponto verde, está embutida uma pequena taxa de reciclagem, que custa centavos de euro. A população separa o lixo em vidro, resíduos orgânicos, embalagens, papel e papelão entre outras classes. O lixo não é recolhido nas residências, como ocorre no caso do Brasil, por exemplo. O lixo é levado às lixeiras de coleta seletiva dispostas nas calçadas, sendo posteriormente recolhido por caminhões que transportam os diferentes tipos de lixo para os locais onde ele é separado e depois comprado como matéria-prima.

No Brasil, entre 1970 a 1982 existiu o lixão de Niterói, no Morro de Bumba. A capacidade de receber lixo se esgotou e como não havia fiscalização na década de 80, o lixão começou a ser ocupado por construção de pequenas casas de alvenaria. A Prefeitura local começou a levar os resíduos sólidos para o aterro controlado de Gramacho, este aterro sanitário é o maior aterro sanitário da América Latina. Localizado no Município de Duque de Caxias (Rio de Janeiro). Em 2011, o local recebia, por dia, mais de 7 mil toneladas de resíduos hospitalares e domiciliares provenientes de dois municípios da Baixada Fluminense e da cidade do Rio de Janeiro. Como o custo de transporte do lixo até Gramacho era caro, a Prefeitura teve que providenciar um local para servir de vazadouro.

Em 1983, todo o lixo de Niterói passou a ser jogado, sem nenhum tratamento, na região do Morro do Céu, vizinha de Viçoso Jardim. Na Figura 2.1, apresentam-se as condições do antigo lixão de Niterói.



Figura 2.1 – Lixão no Morro do Bumba em 1977 (Rio de Janeiro-Brasil).

Na Colômbia, na cidade de Medellín, também foi constatado disposição final de resíduos sólidos de maneira inadequada, como aconteceu no Brasil, por meio de um lixão denominado de Moravia. No início da década de 80, o referido lixão ainda apresentava problemas de ordem pública, porque os catadores, pessoas que trabalham no lixão buscando materiais recicláveis para vender, objetos para suas casas e até alimento para consumo da família, iniciaram um processo de ocupação dos terrenos do lixão. Na Figura 2.2 apresenta-se o Morro de Moravia.



Figura 2.2 – Lixão no Morro de Moravia (Medellín-Colômbia).

### **2.3 CONTAMINAÇÃO DO SOLO E FONTES DE ÁGUA PELA DECOMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS**

O principal agente poluente dos aquíferos é o lixiviado, o qual é produto da decomposição dos resíduos sólidos, por meio de fatores físicos, químicos e biológicos. Segundo Miller Jr. (2008), poluente é qualquer substância presente em um determinado meio, em concentração em níveis acima do tolerável em relação a critérios adotados.

No processo da decomposição dos RS é verificada intensa atividade aeróbia e, conseqüentemente, redução da concentração de oxigênio no meio, originando assim uma fase anaeróbia caracterizada por uma intensa formação de ácidos orgânicos. A taxa de decomposição é função dos resíduos sólidos, da quantidade de oxigênio disponível, da umidade, da temperatura e dos microrganismos presentes (Mota, 1974).

### **2.4 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

As águas subterrâneas são uma parte essencial do ciclo hidrológico, cujo aproveitamento, eficiência na gestão e bom entendimento, garantem a permanência dos recursos hídricos ao longo do tempo. Hoje em dia, as práticas industriais, agrícolas e ambientais, têm causado em muitos aquíferos e aquitardes, impactos por compostos antropogenicamente orgânicos e inorgânicos, cuja consequência imediata, conduz a uma degradação gradual da água subterrânea e, assim, do meio ambiente. Segundo Berkowitz (2008), o transporte dos produtos químicos em forma diluída é chamado de transporte de contaminante.

## 2.5 LIXIVIADO

São líquidos carregados de matéria orgânica decomposta e de produtos químicos tóxicos disseminados no lixo. Geralmente são conduzidos por via subterrânea ou superficial até os rios, onde são incorporados à água. Esses rios encontram-se muitas vezes localizados a poucos metros do aterro, o que caracteriza condição de irregularidade, dado que existem condições de afastamento padronizados de cursos d'água. Em termos gerais, a grande maioria dos aterros possuem sistemas falhos de manejo do lixo e os sistemas de drenagem de líquidos percolados são praticamente ausentes (Gonçalves, 2002).

Os produtos tóxicos presentes no lixiviado são principalmente, metais pesados, que podem ser definidos como qualquer elemento químico metálico, que tenha um alto nível de densidade específica superior a 5 g/ml, e seja tóxico em baixas concentrações. Como exemplos de metais pesados inclui-se o Arsênio (As), o Cádmio (Cd), o Cromo (Cr), o Mercúrio (Hg), o Chumbo (Pb) e o Tálcio (Tl).

Os metais pesados são componentes naturais da crosta terrestre, não podem ser degradados ou destruídos. No entanto, é comum a exposição a cada vez maiores quantidades de tais tipos de poluentes, devido ao progresso tecnológico que, em muitos casos, está relacionado com a capacidade de extrair e processar esses metais. Por tanto, desde os primórdios das civilizações, há registros de zonas poluídas com metais pesados.

Foi identificado que os efeitos de envenenamento por metais eram conhecidos durante o período de desenvolvimento dos métodos para a utilização de metais. Em pequenas quantidades, alguns metais pesados (por exemplo, Cobre, Níquel, Selênio, Zinco) são essenciais para todos os microrganismos, na realização de específicas funções catalíticas de tais organismos. No entanto, em níveis superiores a esses requisitos, todos os metais podem perturbar o metabolismo através da ligação inespecífica de biomoléculas e possibilidade de infligir dano oxidativo, devido à capacidade para catalisar reações redox. Isto pode resultar na desativação de reações enzimáticas essenciais; danos às estruturas celulares (especialmente membranas), e modificação do DNA (mutagênese). Nos seres humanos, a exposição a níveis elevados de metais pode causar sintomas de toxicidade aguda, enquanto a exposição em longo prazo para os níveis mais baixos pode desencadear alergias e até mesmo câncer (Berkowitz, 2008).

Na presente pesquisa, é avaliado o mecanismo de transporte de três metais pesados os quais apresentam implicações graves para a saúde humana, o Cádmio, o Cromo e o Chumbo.

### 2.5.1 Cádmio

O Cádmio em solução aquosa ácida apresenta valência  $Cd^{2+}$ , é encontrado naturalmente no subsolo, em carvão, folhelhos, e outros combustíveis fósseis, sendo também liberado durante a atividade vulcânica. Depósitos de Cádmio podem servir como fontes para águas subterrâneas e superficiais, especialmente, quando em contato com águas ácidas suaves. Cloreto, nitrato e sulfato de sais de Cádmio são solúveis e, em solos, podem apresentar sorção dependendo do pH, aumentando com alcalinidade (Berkowitz, 2008).

O Cádmio pode ser encontrado em associação com minerais de carbonato, ou precipitado como compostos sólidos estáveis, ou coprecipitado com os óxidos de ferro hidratados. O Cádmio absorvido por mineral superficial (por exemplo, argila) ou materiais orgânicos é mais facilmente bioacumulado ou liberado em um estado dissolvido quando os sedimentos são perturbados, como durante as inundações (Berkowitz, 2008).

O Cádmio também está presente como uma impureza em vários produtos, incluindo fertilizante, detergente e produtos de petróleo refinado (Jarup, 2003; EPA, 2005). A contaminação industrial do solo por Cádmio é provavelmente a maior fonte de exposição humana, via absorção em plantas alimentícias e fumo (Hayes, 1997).

O Cádmio é biopersistente e, uma vez absorvido pelo organismo, permanece residente durante muitos anos com uma semi-vida biológica de 10-30 anos, embora seja eventualmente excretado (McMurray & Tainer 2003). Exposições agudas podem causar vários efeitos deletérios à saúde em seres humanos, incluindo náuseas, vômitos, diarreia, câibras musculares, salivação, distúrbios sensoriais, lesões hepáticas, convulsões, choque e insuficiência renal crônica, os efeitos podem incluir um potencial para causar lesões nos rins, fígado, ossos, sangue e danos de exposição em longo prazo (EPA, 2005).

Os compostos de Cádmio são classificados como cancerígenos em seres humanos por várias agências reguladoras. Os dados mais convincentes que o Cádmio é cancerígeno em humanos vêm de estudos indicando que a exposição ao Cádmio está associada ao câncer de pulmão. A exposição adicional para os seres humanos surge através da presença de Cádmio no ar ambiente e água (Bear, 2010).

### 2.5.2 Cromo

Segundo Fetter (1993), em águas subterrâneas, em geral, o crômio hexavalente,  $\text{Cr}^{6+}$  é móvel e solúvel enquanto que o crômio trivalente,  $\text{Cr}^{3+}$ , é imóvel e insolúvel. O grau de toxicidade do Cromo é diferente para cada uma das duas espécies, especialmente, Cromo VI e Cromo III. Esta variação de níveis de toxicidade é regulada separadamente para cada estado de oxidação, diferentemente de todos os outros metais pesados, que são regulados em função da sua concentração total (Kimbrough et al. 1999).

O Cromo III ocorre naturalmente no meio ambiente e é um elemento essencialmente nutriente. O Cromo VI e Cromo 0 são geralmente produzidos por processos industriais. A Cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) é o minério comercial mais importante e, geralmente, está associada com rochas ultramáficas e serpentina. O Cromo é também associado com os outros corpos de minério por exemplo, o Urânio e pode ser encontrado em rejeitos e outros resíduos provenientes dessas operações de mineração.

O metal Cromo 0 é usado para a produção de aço. O Cromo VI e Cromo III são usados para cromagem, fabricação de corantes e pigmentos, curtimento de couro e preservação da madeira. O Cromo ingressa no ar, na água e no solo, na forma de Cromo III e Cromo VI.

A forma mais estável de Cromo é o óxido trivalente, esta forma tem baixa solubilidade e baixa reatividade, resultando em baixa mobilidade no ambiente e baixa toxicidade em organismos vivos. No entanto, a forma trivalente, geralmente, estável e não tóxica de Cromo pode ser transformada (oxidada) no ambiente em cromato ( $\text{CrO}_4$ ) e dicromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_7$ ), que são móveis e tóxicos. Anions de Cromo hexavalente é a forma predominante de Cromo dissolvido em águas que são alcalinos e levemente oxidantes. Apesar da contaminação de Cromo hexavalente está geralmente associada à atividade industrial, pode ocorrer naturalmente, (Berkowitz, 2008).

### 2.5.3 Chumbo

Segundo Berkowitz (2008), o Chumbo é um dos metais mais antigos utilizados por seres humanos. Tem sido amplamente utilizado desde 5000 a.C., sendo conhecido pelos antigos egípcios e babilônios. Os romanos usavam Chumbo na constituição de tubos e solda.

Está presente na natureza como um elemento-traço, em solução aquosa, encontra-se, como  $\text{Pb}^{4+}$ . O elemento tem quatro isótopos estáveis, três dos quais resultam da deterioração natural

que ocorre nos elementos radioativos (Tório e Urânio). Embora o Chumbo seja raramente encontrado sozinho na natureza, os seus compostos são largamente distribuídos, principalmente nos minérios galena, um minério de sulfureto de Chumbo, cerussite ( $\text{PbCO}_3$ ) e anglesite ( $\text{PbSO}_4$ ).

Até os avanços tecnológicos recentes, a utilização comercial mais importante de Chumbo era na fabricação de baterias, no entanto, para a maior parte do século XX, a maior fonte ambiental de Pb destinou-se à combustão de gasolina e para fabricação de ácido sulfúrico.

A contaminação de Chumbo nas águas subterrâneas se origina a partir da dissolução de Chumbo do solo e da crosta da Terra. As partículas de Chumbo a partir da combustão de Chumbo gasolina e da fundição de mineradoras podem contaminar as águas superficiais locais por escoamento superficial. Na crosta terrestre, pode-se encontrar uma larga distribuição de Chumbo em rocha e solos sedimentares, com um teor médio de Chumbo 10 mg/kg (10 ppm) a camada superior do solo, e uma gama de 7-12,5 ppm em rocha sedimentar (EPA 1992).

Em solos, o Chumbo está presente em forma de carbonatos e complexos de hidróxido. A forte absorção do solo pode limitar ainda mais, as concentrações de Chumbo em águas superficiais e subterrâneas.

O envenenamento por Chumbo é um perigo para a saúde pública e ambiental em proporções globais. Crianças e adultos em praticamente todas as regiões do mundo estão sendo expostos a níveis inseguros de Chumbo no ambiente através de diferentes vias como o ar, os alimentos, a água, a poeira e o solo. A intoxicação pode ocorrer a partir de alto nível exposição ou o efeito cumulativo de exposições repetidas de alto ou de baixo nível (Feter, 2008).

## **2.6 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE POLUENTES NO SOLO E NA ÁGUA**

### **2.6.1 Mecanismo de Advecção**

Segundo Domenico & Schwartz (1998), a advecção é o processo de transporte de substâncias em solução ou suspensão com o movimento do fluido. O escoamento do fluido ocorre devido à força de gravidade, sendo retardado pelo atrito interno (viscosidade) e pelo atrito de contato entre o fluido e os sedimentos associados.

Segundo Zheng et al. (1999), a velocidade de transporte do fluido, quando não reage com o meio poroso, é igual ao do fluxo da solução que o conduz, enquanto sua concentração mantém-se constante. O comportamento do fluxo é diferenciado no caso saturado e não saturado. No fluxo para um meio saturado, homogêneo e isotrópico é usada a Lei de Darcy:

$$v_y = -k \left( \frac{\Delta H}{\Delta L} \right) = -ki \quad (2.1)$$

onde  $v_y$  é a velocidade de percolação [L/T],  $k$  representa a condutividade hidráulica que depende do meio poroso e do fluido [L/T],  $\Delta H$  é a diferença da carga hidráulica entre dois pontos [L] de uma coluna de solo de comprimento  $\Delta L$  [L]. A fração  $\Delta H/\Delta L$  é o gradiente hidráulico ( $i$ ) [L/L, adimensional].

Segundo Fetter (1993), neste mecanismo, a frente de contaminação é abrupta e move-se a uma velocidade linear igual à velocidade linear média ( $\bar{v}_y$ ) do solvente. É calculada pela Lei de Darcy modificada que leva em consideração a porosidade do meio:

$$\bar{v}_y = -\frac{v_y}{n} \quad (2.2)$$

onde,  $n$  é a porosidade obtida em laboratório.

Em três dimensões, a advecção é descrita matematicamente por:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad (2.3)$$

onde,  $c(x,y,z,t)$  é a concentração do soluto [M/L<sup>3</sup>],  $t$  é o tempo [T],  $x, y, z$  são as direções do sistema cartesiano adotado [L],  $(x,y,z)$  é o ponto onde se quer analisar a concentração no tempo  $t$  [T] e  $v_x, v_y, v_z$  são as velocidades advectivas [L/T] nas direções  $x,y,z$ . Todas as velocidades são maiores que zero e constantes durante todo o processo de transporte. A equação de advecção em três dimensões espaciais, Eq. (2.3), assume que a concentração de poluentes é homogênea em todo o fluxo de água. Ao se utilizar esta equação para calcular o transporte advectivo de uma pluma de contaminação num ponto qualquer, por exemplo, de um rio, a concentração da pluma permanece inalterada (Van der Perk, 2007).

## 2.6.2 Mecanismo de Dispersão Hidrodinâmica

A dispersão hidrodinâmica é o mecanismo responsável pelo espalhamento dos poluentes no meio poroso expandindo e diluindo a pluma de contaminação. Constituinto um processo transiente e de mistura irreversível. As moléculas, à medida que são transportadas, tendem a se afastar da trajetória principal, sem variar a massa, mas aumentando o volume da pluma pela dispersão no espaço poroso, algumas com velocidades maiores que as outras, ocasionando assim a diluição da solução.

A dispersão hidrodinâmica é a junção de dois mecanismos:  $D_m$  é a dispersão mecânica é consequência da heterogeneidade da velocidade no interior do sistema. É o fenômeno encarregado pelo espalhamento. A difusão molecular  $D^*$ , ocorre devido a gradientes de concentração diferentes. Segundo Freeze & Cherry (1979), tudo ocorre numa escala microscópica e pode ser expressa pelo coeficiente de dispersão hidrodinâmica ou, simplesmente, coeficiente de dispersão.

$$D_h = D^* + D_m \quad (2.4)$$

onde,  $D_h$  é o coeficiente de dispersão hidrodinâmica,  $D^*$  é a difusão molecular,  $D_m$  é a dispersão mecânica (Figura 2.3).

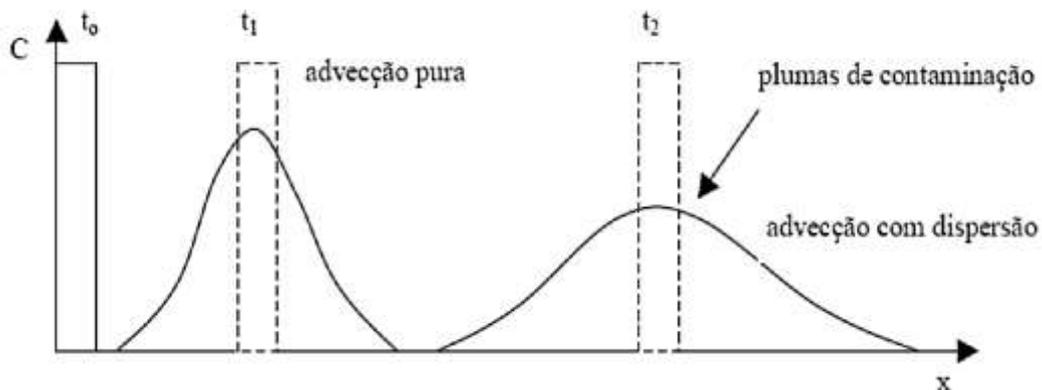


Figura 2.3 – Representação esquemática do processo de espalhamento causado pela dispersão, modificada de Vargas (2001).

### 2.6.2.1 Difusão Molecular ( $D^*$ )

A difusão molecular  $D^*$  é um processo microscópico, sob uma abordagem em escala molecular, resultante da movimentação aleatória das moléculas do soluto no interior da fase

líquida. A taxa do movimento é diretamente proporcional ao gradiente de concentração, fazendo que a substância migre das regiões de maior concentração para as de menor concentração. Esse processo independe da velocidade do fluxo e, por isso, para velocidades muito baixas (velocidades nulas), o mecanismo de difusão molecular tende a ser o fenômeno dominante (Demuelenaere, 2004).

A teoria da difusão molecular é aplicada em baixas velocidades e é fundamentada pela primeira e segunda Lei de Fick. A primeira Lei de Fick assegura que, a massa de substância difusiva que atravessa uma seção transversal na unidade de tempo é proporcional ao gradiente de concentração (Fetter, 2008):

$$F_x = -D^*_x \frac{\partial c}{\partial x}; \quad F_y = -D^*_y \frac{\partial c}{\partial y}; \quad F_z = -D^*_z \frac{\partial c}{\partial z} \quad (2.5)$$

onde,  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  são fluxos difusivos de soluto por unidade de área e por unidade de tempo [M/T];  $D^*_x$ ,  $D^*_y$  e  $D^*_z$  são coeficientes de difusão [L<sup>2</sup>/T] nas direções do fluxo  $x$ ,  $y$  e  $z$ ;  $c$  é a concentração do soluto [M/L<sup>3</sup>];  $\partial c/\partial x$ ,  $\partial c/\partial y$  e  $\partial c/\partial z$  são gradientes de concentração [M/L<sup>3</sup>/L], nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

A transferência de massa continua até que o equilíbrio seja atingido, ou seja, até que o gradiente de concentração se torne nulo em todos os lugares. A primeira Lei de Fick não considera o fato de que o gradiente de concentração em um material diminui com o passar do tempo. Esse fato é importante para os processos de difusão. O coeficiente de difusão depende das propriedades químicas e termodinâmicas da substância e da temperatura da água. A magnitude da difusão molecular aumenta proporcionalmente com o aumento da temperatura e diminuição do tamanho das moléculas.

A segunda Lei de Fick descreve a difusão molecular em estado transiente, e neste caso, é utilizada a equação diferencial parcial dada por:

$$\frac{\partial c}{\partial t} - D^*_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - D^*_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} - D^*_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = 0 \quad (2.6)$$

A difusão molecular em meio poroso ( $D^*$ ) difere do coeficiente de difusão molecular em solução aquosa ( $D$ ), devido ao efeito da tortuosidade criada pelas partículas minerais. O fator de tortuosidade é estimado por (Bear & Bachmat, 1990):

$$\tau = \left( \frac{l}{l_e} \right)^2 \quad (2.7)$$

onde  $l$  é a distância em uma escala macroscópica definida pela trajetória reta entre dois pontos de uma linha de fluxo e  $l_e$  é a distância real em uma escala microscópica, efetiva de transporte entre esses dois pontos. Bear (1972) apresenta a relação entre  $D^*$  e  $D$ :

$$D^* = \tau \cdot D \quad (2.8)$$

onde  $D^*$  representa o coeficiente de difusão molecular em meio poroso,  $D$  é o coeficiente de difusão molecular em solução aquosa livre (ideal na água),  $\tau$  é tortuosidade. O coeficiente de difusão molecular ( $D^*$ ) pode ser determinado em laboratório, no entanto, ainda não se encontra normatizado este procedimento.

### 2.6.2.2 Dispersão Mecânica

A dispersão mecânica ( $D_m$ ) é caracterizado pela tendência do poluente se dispersar, pelas diferentes velocidades de movimentação mecânica dos solutos e acontece predominantemente na escala macroscópica. Esse fenômeno ocorre durante a advecção, pela propagação do soluto devido à heterogeneidade da velocidade no movimento do fluido nos diversos caminhos percorridos pelo fluxo através do meio (Freeze & Cherry, 1979).

Segundo Fetter (1993), as variações na velocidade são devido a fatores como o tamanho dos poros, o comprimento da trajetória, além disso, algumas partículas percolam por caminhos mais longos. O fluido movimenta-se mais rapidamente nos poros mais estreitos e este movimento é maior no centro do poro. Na Figura 2.4 apresenta-se a distribuição das velocidades em poros e canais.

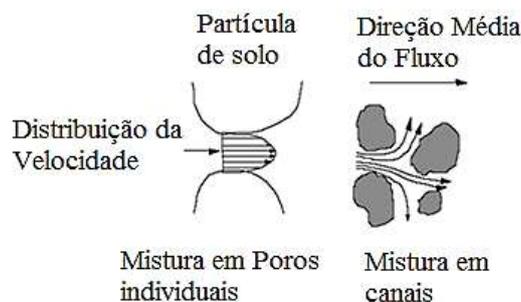


Figura 2.4 – Distribuição das velocidades (modificada Freeze & Cherry, 1979).

A velocidade do fluxo varia dentro dos poros do solo devido à mudança na área dos canais vazios do meio, isto faz com que a solução se disperse, este fenômeno é representado com o coeficiente de dispersividade ( $\alpha_L$ ), que pode assumir diferentes valores nas direções longitudinal e lateral, dependendo das características do meio. Assim, o coeficiente de dispersão mecânica é função da dispersividade e da velocidade do fluido. O sentido longitudinal dado por:

$$D_m = \alpha_L * V_L \quad (2.9)$$

onde  $D_m$  é o coeficiente de dispersão mecânica [ $L^2/T$ ],  $\alpha_L$  é o coeficiente de dispersividade na direção longitudinal ao fluxo [L] e  $V_L$  velocidade linear média longitudinal [L/T].

### 2.6.3 Mecanismo de Sorção

O termo sorção é utilizado para designar genericamente os mecanismos que envolvem a transferência generalizada do soluto (íon ou molécula) da fase líquida para a superfície das partículas sólidas. A concentração do poluente vai diminuindo com o tempo à medida que se afasta da fonte. A sorção é um processo físico-químico que engloba fenômenos como adsorção-dessorção, solução-precipitação, oxidação redução (Fetter, 2008).

É de grande importância conhecer a composição do poluente, como tipos de metais contidos e suas concentrações, pH, temperatura e potencial de redox (EH), para determinar qual processo de retenção está atuando no fenômeno (Gebhard, 1978).

Segundo Boscov (2008), adsorção é um processo físico-químico. A sorção está relacionada às forças eletrostáticas de atração e repulsão segundo a Lei de Coulomb. A sorção química se dá entre uma molécula e átomos superficiais, formando novos compostos. O poluente movimenta-se mais lentamente que o fluido que o transporta devido à acumulação nos vazios ou sobre parte da matriz sólida do meio poroso. Este fenômeno é conhecido como retardamento.

A dessorção é o fenômeno que ocorre quando o poluente é liberado das partículas de solo para o fluido intersticial. É a transferência da superfície das partículas sólidas para a fase líquida de uma substância sorvida anteriormente. As reações de dessorção são, em geral, reações de superfície e não implicam necessariamente na formação de uma nova substância (como no caso da precipitação ou na formação de complexos). Esses processos são governados pelas

propriedades da superfície das partículas sólidas do solo (orgânicas ou inorgânicas) e pelas propriedades químicas e físico-químicas do poluente e seus constituintes (cátions, ânions e moléculas não iônicas) (Bosco, 2008).

Segundo Nascentes (2006), alguns metais podem aumentar a mobilidade ao competir com outros metais adsorvidos pelo solo, a mobilidade dos metais é maior em solos arenosos e ácidos, com baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e com baixo teor de matéria orgânica e de argila. Segundo Fetter (2008), os metais são cátions que apresentam mobilidade razoavelmente limitada no solo e na água subterrânea, devido à sorção na superfície da fração sólida do meio poroso.

Segundo Fetter (2008) o retardamento que ocorre durante a migração de poluentes é totalmente atribuído aos processos de sorção (adsorção/dessorção). Ou seja, o coeficiente de retardo  $R$  [adimensional], quantifica a sorção. Segundo Bear & Cheng (2010), o retardamento em um meio poroso saturado pode ser calculado, no caso de isotermas de sorção lineares, por:

$$R = 1 + \frac{\rho_d K_d}{n} \quad (2.10)$$

onde,  $\rho_d$  é massa específica seca do solo [ $M/L^3$ ];  $K_d$  é o coeficiente de distribuição ou adsorção [ $L^3/M$ ];  $n$  é a porosidade do solo [adimensional].

A sorção é determinada mediante o ensaio de sorção ou equilíbrio em lote, onde se analisa as concentrações no fluido afluente como na solução final, em condições específicas. Esta relação é graficada e as curvas resultantes são chamadas isotermas de sorção. O coeficiente de distribuição pode ser determinado a partir do gráfico das isotermas de sorção que relacionam a quantidade de adsorvato no adsorvente,  $S$ , com a concentração  $c$ .

Entre os modelos de isotermas mais conhecidos encontram-se o linear ( $c$  versus  $S$ ), o de Freundlich ( $\log(c)$  versus  $\log(S)$ ) e o de Langmuir ( $1/c$  versus  $1/S$ ) (Bosco, 2008).

#### 2.6.3.1 Isoterma Linear ( $c$ versus $S$ )

Nesse caso, a sorção aumenta linearmente com o aumento da concentração:

$$S = K_d c \quad (2.11)$$

onde  $S$  [ $M/M$ ] corresponde à massa de soluto adsorvida por massa de solo proporcional à concentração de equilíbrio da solução conhecida como  $c$  [ $M/L^3$ ].

Na Figura 2.5, a inclinação da reta corresponde ao coeficiente de distribuição  $K_d$  [ $L^3/M$ ]. Segundo Rowe et. al. (1995), a relação existente entre  $S$  e  $c$  é considerada uma aproximação razoável para baixas concentrações de poluentes.

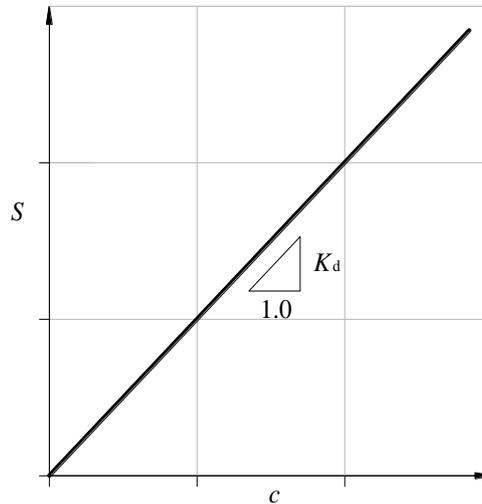


Figura 2.5 – Isoterma linear (Rowe et al, 1995).

### 2.6.3.2 Isoterma de Freundlich

No modelo de Freundlich a isoterma é dada por:

$$S = K \cdot c^N \quad (2.12)$$

onde  $N$  é o coeficiente exponencial de Freundlich e  $K$  é o coeficiente de partição de Freundlich. Eles poderão ser obtidos por meio do gráfico  $S$  versus  $c$ . Em escalas logarítmicas,  $N$  é o coeficiente angular da reta obtida e  $\log(K)$  é o intercepto no eixo das ordenadas (Figura 2.6). Outra forma de obter os parâmetros é ajustar uma equação aos pontos da isoterma usando regressão não linear:

$$\log(S) = N \log(c) + \log K \quad (2.13)$$

onde  $N$  é o coeficiente angular da reta obtida e  $\log K$  é o intercepto no eixo das ordenadas.

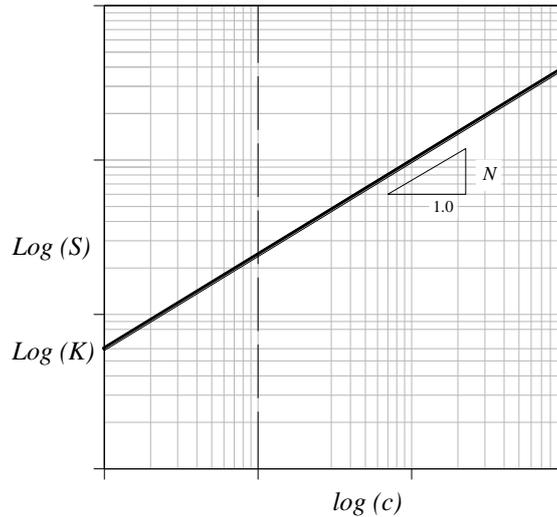


Figura 2.6 – Representação gráfica para determinação dos parâmetros (Rowe et. al., 1995).

### 2.6.3.3 Isoterma de Langmuir ( $1/c$ versus $1/S$ )

A isoterma de Langmuir é dada por:

$$S = \frac{S_m bc}{1+bc} \quad (2.14)$$

onde  $b$  denota a taxa cinética constante de saída e de entrada de constituintes nos locais de sorção [ $L^3/M$ ] e  $S_m$  expressa a quantidade máxima sorvida pelo solo.

Os parâmetros da isoterma podem ser obtidos pelo método de linearização, feito por meio da inversão dos parâmetros  $S$  e  $c$ . A equação que a representa o modelo é:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S_m bc} + \frac{1}{S_m} \quad (2.15)$$

onde o coeficiente angular é dado por  $1/S_m b$ , e o intercepto da reta no eixo das ordenadas por  $1/S_m$  (Figura 2.7).

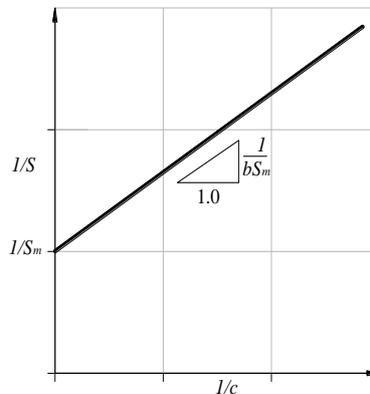


Figura 2.7 – Isoterma de Langmuir (Rowe et. al., 1995).

#### **2.6.4 Precipitação**

Segundo Lagrega et al. (1994), a precipitação trata-se da acumulação de material (solutos) na interface das partículas sólidas insolúveis. Ocorre quando soluções químicas dissolvidas são depositadas a partir de uma solução, onde a concentração do elemento excede seu limite de solubilidade, esta reação depende das espécies iônicas envolvidas, suas concentrações, temperatura e pH.

#### **2.6.5 Oxidação e redução**

Os processos de oxidação e redução referem-se à perda ou ganho de oxigênio. Ocorrem em compostos orgânicos e inorgânicos.

#### **2.6.6 Biodegradação**

Biodegradação é o processo biológico no qual microrganismos absorvem o poluente. Uma espécie química em dissolução ou adsorvida na superfície de uma partícula sólida é transformada em outros produtos devido às reações bioquímicas como quebra de resíduos compostos de carbono, produção de vários ácidos orgânicos. Os novos produtos podem ser mais perigosos que o composto inicial.

#### **2.6.7 Decaimento Radioativo ( $\lambda$ )**

Este processo é irreversível, somado à precipitação faz com que ocorra uma diminuição da concentração do poluente na pluma com o tempo, causando a atenuação, sem necessariamente diminuir a velocidade de movimento da pluma de contaminação.

Segundo Bear (1979), a taxa na qual ocorre um processo de decaimento em uma amostra radioativa é proporcional ao número de núclídeos radioativos presentes na amostra e pode ser representado por:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\lambda c \quad (2.16)$$

onde,  $\lambda$  é a meia vida dos núclídeos radioativos [1/T]. Destes processos de interação, somente as reações de sorção e decaimento radioativo, são rotineiramente modeladas (Ritter et al., 1999).

## 2.7 MODELO MATEMÁTICO DO TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

Teoricamente, a taxa de variação da concentração do soluto no solo pode ser descrita corretamente pela equação de advecção-dispersão-sorção e pode ser descrita por Wexler (1992):

$$\frac{\partial \theta_w c}{\partial t} = -\vec{\nabla} \left[ \theta_w \vec{v} c - \theta_w \bar{\bar{D}} \cdot \vec{\nabla} c \right] - \theta_w Q_s \quad (2.17)$$

onde  $\theta_w$  é o teor de umidade volumétrica do solo [ $L^3/L^3$ ],  $c$  é a concentração volumétrica do soluto [ $M/L^3$ ],  $t$  é o tempo [T],  $\vec{\nabla}$  é o operador gradiente,  $\bar{\bar{D}}$  é o tensor de dispersão hidrodinâmica [ $L^2/T$ ],  $Q_s$  é usado para representar uma fonte geral para a produção ou a perda de soluto no sistema, as reações químicas, físicas e as transformações de processos de ordem  $n$  ( $M/L^3T$ ) e  $\vec{v}$  é a velocidade média do fluido intersticial [ $L/T$ ] o qual é definido como:

$$\vec{v} = -\frac{\vec{k}(\theta_w)}{\theta_w} \cdot \vec{\nabla} h \quad (2.18)$$

onde  $\vec{k}$  o tensor de condutividade hidráulica para o meio [ $L/T$ ] e  $\vec{\nabla} h$  é o gradiente hidráulico [adimensional].

Admitindo-se aquíferos com dimensões infinitas, a Eq. (2.18) é resolvida analiticamente usando transformada de Laplace no tempo e transformada de Fourier em relação aos eixos coordenados, adotando-se as condições, inicial e de contorno, definidas por:

$$c(x, y, z, 0) = c_0 \left[ u\left(x + \frac{b}{2}\right) - u\left(x - \frac{b}{2}\right) \right] \left[ u\left(y + \frac{l}{2}\right) - u\left(y - \frac{l}{2}\right) \right] \left[ u\left(z + \frac{m}{2}\right) - u\left(z - \frac{m}{2}\right) \right] \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x}(\pm\infty, y, z, t) = 0 \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial c}{\partial y}(x, \pm\infty, z, t) = 0 \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial c}{\partial z}(x, y, \pm\infty, t) = 0 \quad (2.22)$$

onde  $u(x)$  representa a função Heaviside, dada por:

$$u(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases} \quad (2.23)$$

A Eq. (2.19) corresponde a um prisma com concentração constante  $c_0$  centrado na origem, cujos comprimentos de lados são  $b$ ,  $l$  e  $m$ , tal como apresentado na Figura 2.8.

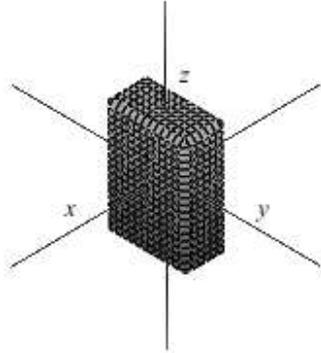


Figura 2.8 – Distribuição da concentração inicial (Ozelim & Cavalcante, 2013).

Portanto, nestas condições, a solução da Eq. (2.15) é dada por (Ozelim & Cavalcante, 2013):

$$c(x, y, z, t) = \frac{c_0 e^{-\lambda^* t}}{8} \cdot \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{\frac{b}{2} - x + V_x^* t}{\sqrt{4D_x^* t}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{-\frac{b}{2} - x + V_x^* t}{\sqrt{4D_x^* t}} \right) \right] \cdot \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{\frac{l}{2} - y + V_y^* t}{\sqrt{4D_y^* t}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{-\frac{l}{2} - y + V_y^* t}{\sqrt{4D_y^* t}} \right) \right] \cdot \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{\frac{m}{2} - z + V_z^* t}{\sqrt{4D_z^* t}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{-\frac{m}{2} - z + V_z^* t}{\sqrt{4D_z^* t}} \right) \right] \quad (2.24)$$

em que,  $\operatorname{erf}(x)$  indica a função erro, definida pela equação:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-j^2} dj \quad (2.25)$$

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Para uma análise detalhada do comportamento do fluxo de contaminante no Morro de Moravia foi necessário trabalhar com duas metodologias: Uma em pequena escala com ensaios laboratoriais do material do Morro e outra em grande escala com ensaios de campo realizados em Moravia.

#### **3.1 ENSAIOS DE LABORATÓRIO**

Para as análises laboratoriais foram utilizados dois tipos de amostras: amostra deformada para realização dos ensaios de classificação, e amostras indeformadas para os ensaios com contaminantes.

##### **3.1.1 Descrição do local da coleta**

O local inicialmente escolhido para obtenção das amostras, foi o próprio lixão. Houve várias tentativas de obtenção das amostras em diferentes trechos do Morro. Observou-se uma grande dificuldade de coleta de solo nesta região. O material encontrado foi inadequado. Isto ocorreu porque nas perfurações feitas no Morro encontrou-se uma massa de lixo envolvida em plástico, com diferentes proporções de outros materiais como vidro, concreto, madeira, metais, tecidos semidegradados e matéria orgânica. Em nenhuma tentativa, se encontrou uma matriz do solo compacto (material ideal para fazer os ensaios).

Devido às justificativas apresentadas anteriormente e em função da necessidade de conhecimento do nível de contaminação gerado pelo lixão que chega ao Rio Medellín, foram coletadas amostras no substrato da margem direita do referido rio, no trecho localizado a cerca de 10 metros da encosta ocidental do depósito de lixo Moravia.

O solo amostrado apresenta nas camadas superficiais (0 a 0,40 m) uma mistura de material arenoso escuro com diferentes proporções de outros materiais como plástico, vidro, concreto, madeira, metais, tecidos semi degradados e matéria orgânica. O solo do entorno que fica em contato direto com a área de deposição é formado principalmente por areias aluviais e cascalhos, fornecendo condições facilitadoras para ocorrência de fluxo de contaminantes em

direção ao Rio Medellín. Na Figura 3.1 apresenta-se a consistência do material impróprio coletado no Morro e os taludes verticais formados por plásticos no Morro e os taludes verticais formados por plásticos.

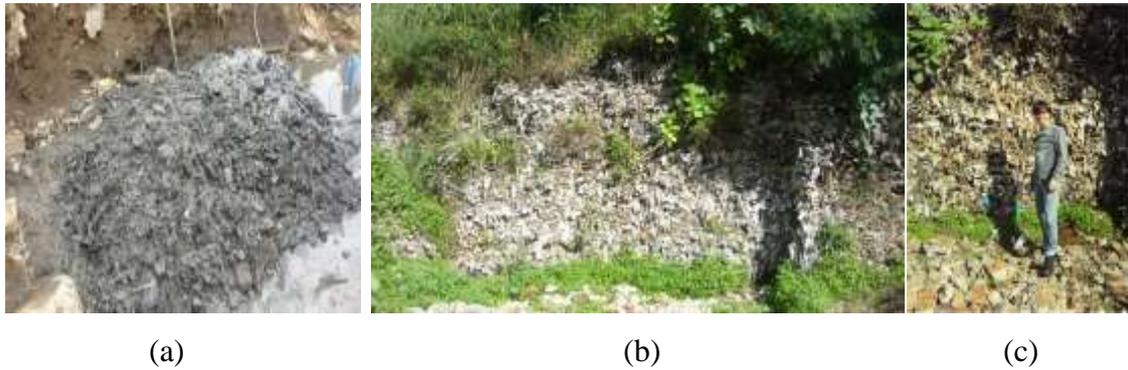


Figura 3.1 – (a) consistência do material coletado, (b) taludes verticais formados por plásticos no Morro e (c) Altura do talude.

Depois de encontrar o local adequado, foram realizadas cinco perfurações onde foram coletadas amostras deformadas e indeformadas a um metro de profundidade sobre a margem direita do Rio Medellín. Para medir a profundidade de coleta das amostras utilizou-se como referência à estrada que separa o rio do lixão. Na Figura 3.2 apresenta-se o local onde as amostras foram coletadas.



Figura 3.2 – Local de amostras coletadas à margem direita do Rio Medellín.

Verificou-se que o solo coletado é composto basicamente por material aluvial depositado nas margens do rio e que, finalmente, tornou-se parte do sistema que envolve a periferia do Morro, afetada pelo lixiviado do lixão.

### **3.1.2 Coleta do Solo e Preparação do Ensaio**

Para a coleta das amostras foram feitas cinco sondagens utilizando amostradores Shelby na área de influência do lixão. Todas as amostras foram coletadas na margem direita do Rio Medellín, sendo esta a área de maior influência do depósito de lixo e mais antiga. As amostras coletadas foram dos tipos, deformadas e indeformadas, sendo mantida a umidade natural para conservar as características do solo local.

As cinco amostras foram tomadas a um metro de profundidade com referência à estrada que fica na base do lixão e separa este do Rio. As perfurações foram distanciadas cerca de oito metros com o objetivo de cobrir uma maior área da base do lixão.

Imediatamente após a coleta, as amostras foram conduzidas ao laboratório de Geotecnia e Pavimentos da Universidade Nacional da Colômbia. Foram medidas as umidades em estado natural. Os ensaios de caracterização foram realizados com as amostras secas ao ar, sempre considerando a umidade inicial. Os ensaios de classificação foram realizados nas cinco amostras. Foram realizados limite de liquidez - NBR 6459 (ABNT, 1984), limite de plasticidade - NBR 7180 (ABNT, 1984), limite de contração - NBR 7183 (ABNT, 1982), análise granulométrica com lavagem sobre a peneira N<sup>o</sup> 200 e hidrômetro, peneiramento e sedimentação - NBR 7181 (ABNT, 1984), massa específica dos grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm - NBR 6457 (ABNT, 1986), ensaio de equilíbrio em lote ou BET – Batch Equilibrium Test (EPA, 1992). Utilizando as amostras indeformadas foram realizados ensaios em coluna.

### **3.1.3 Umidade (w)**

A amostra foi seca na estufa até constância de massa. O teor de água é calculado como a relação da massa de água e a massa da amostra seca, sendo tal procedimento feito três vezes para cada amostra, adotando-se o valor médio, expresso em percentagem NBR 6457 (ABNT, 1986).

### 3.1.4 Granulometria com peneiramento e sedimentação

Este método determina a quantidade de partículas na distribuição de tamanhos do solo. A distribuição de partículas maiores de 75  $\mu\text{m}$  (retido na peneira N<sup>o</sup> 200) é determinado por peneiramento e a distribuição de partículas menores que 75  $\mu\text{m}$  é determinado por processos de sedimentação NBR 7181 (ABNT, 1984) e ASTM C136.

O ensaio de sedimentação determina o tamanho e o percentual das partículas do solo, fundamentado no total estimado de sólidos em suspensão para a fração fina que passa pela peneira N<sup>o</sup> 200 e por peneiramento da fração grossa retida na mesma. Na Figura 3.3 são ilustrados alguns procedimentos do ensaio de granulometria e na Tabela 3.1 as classes texturais segundo as normas

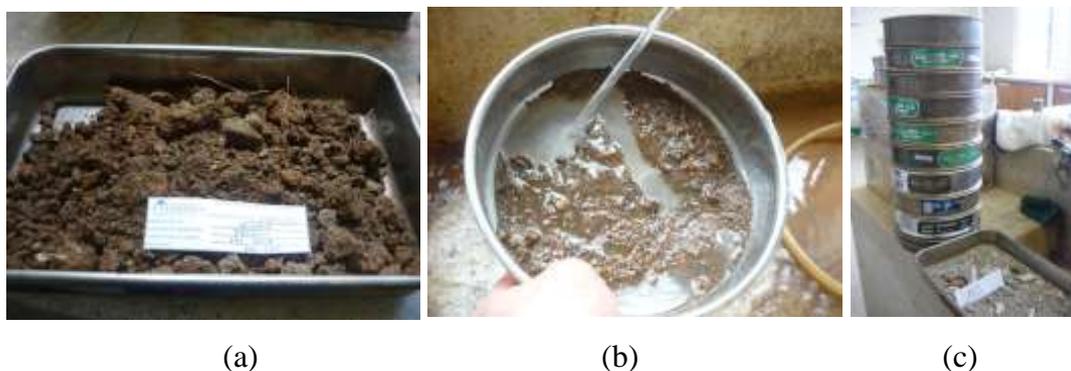


Figura 3.3 – Procedimentos do ensaio de granulometria, (a) amostra deformada, (b) lavagem na peneira N<sup>o</sup> 200 e (c) peneiramento.

Tabela 3.1 – Relação das classes texturais segundo a ABNT e ASTM.

CLASSES TEXTURAIS		
SOLO	ABNT NBR6502/95	ASTM
PEDREGULHO	2 a 60 mm	4,75 a 75 mm
grosso	20 a 60 mm	19,0 a 75 mm
médio	6 a 20 mm	
fino	2 a 6 mm	4,75 a 19 mm
AREIA	0,06 a 2 mm	0,075 a 4,75 mm
grossa	0,6 a 2 mm	2 a 4,75 mm
média	0,2 a 0,6 mm	0,42 a 2 mm
fina	0,06 a 0,2 mm	0,075 a 0,42 mm
SILTE	0,002 a 0,06 mm	0,005 a 0,075 mm
ARGILA	< 0,002 mm	< 0,005 mm

### 3.1.5 Massa específica dos grãos do solo ( $\rho_s$ )

Este ensaio foi feito de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 1986). A amostra foi seca ao ar até que a umidade higroscópica fosse aproximadamente atingida, sendo posteriormente homogeneizada e submetida a peneiramento na peneira de 4,8 mm. Em seguida se tomou cerca de 500 g dessa amostra para a realização de dois ensaios.

Foi pesada uma amostra de 60 g para ser usada no picnômetro de 500 cm<sup>3</sup>, e com o restante do material, foi efetuada a determinação da umidade. Na sequência, o picnômetro foi preenchido com água destilada até metade do volume do copo do picnômetro e aquecido em banho maria com glicerina por 15 minutos. Depois deixou-se o picnômetro em repouso até que a temperatura do mesmo se equilibrasse com a do ambiente. Utilizando uma conta gotas, foi adicionada água destilada até coincidir com a marca de referência do picnômetro. Na Figura 3.4 é ilustrado o procedimento de execução do ensaio de massa específica dos grãos.



Figura 3.4 – Ensaio massa específica dos grãos.

Em seguida enxugou-se a parte externa do picnômetro e o mesmo foi levado para pesagem junto com a água e solo presentes. Com uso de um termômetro se determinou a temperatura do conteúdo do picnômetro para determinar a massa do mesmo preenchido com água até a marca de referência, utilizando a curva de calibração correspondente.

O cálculo é feito a partir da relação entre a massa ou peso específico, da fase sólida do solo e a massa ou o peso específico de igual volume de água pura a 20 °C. Esta propriedade é adimensional e permite o cálculo do índice de vazios e da porosidade.

### 3.1.6 Limites de Atterberg

Este ensaio determina o limite de liquidez NBR 6459 (ABNT, 1984), limite plástico NBR 7180 (ABNT, 1984), limite de contração NBR 7183 (ABNT, 1982) e índice de plasticidade dos solos. Os resultados são utilizados individualmente e em conjunto com outras propriedades do solo, para correlacionar com o comportamento de engenharia esperado para os materiais, tais como compressibilidade e a condutividade hidráulica (permeabilidade). Os limites em algumas das amostras coletadas foram medidos mediante o ensaio de penetrômetro de cone devido a alta porcentagem de areia. Apresenta-se na Figura 3.5, a execução dos ensaios de limites de liquidez e limite plástico.

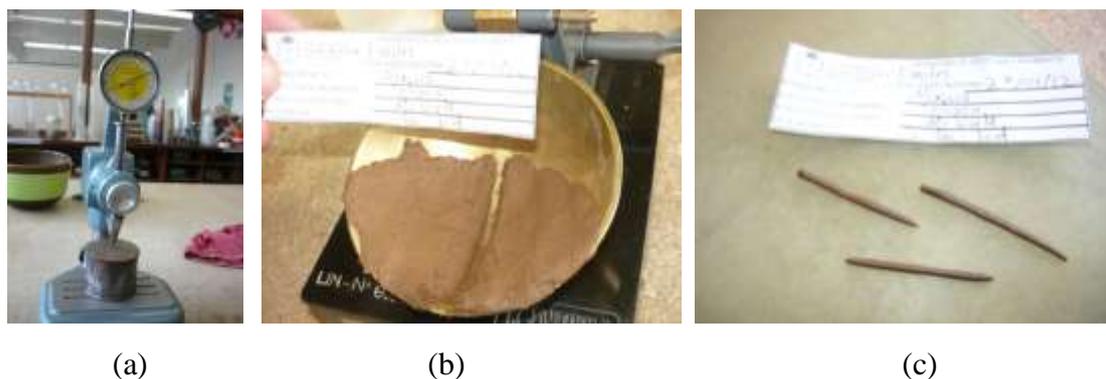


Figura 3.5 – Ensaio de limites de liquidez e limite plástico, em (a) ensaio de penetrômetro de cone, (b) aparelho de casagrande e (c) limite de plasticidade.

### 3.1.7 Peso específico natural ( $\gamma_n$ )

O peso específico natural é definido como o peso por unidade de volume. No sistema internacional a unidade é  $\text{kN/m}^3$ . É calculado multiplicando-se a massa volumétrica do material ( $\text{kg/m}^3$ ) pela aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ). Um dos métodos utilizados para determinar-se o peso específico natural é por meio do ensaio da balança hidrostática regulamentado pela NBR 10838 (ABNT, 1988).

### 3.1.8 Índice de vazios (e)

O índice de vazios é expresso como um número, ou seja, é uma grandeza adimensional e, portanto não possui unidade. É definido como o volume dos vazios ( $V_v$ ) dividido pelo volume ocupado pelas partículas sólidas ( $V_s$ ) de uma amostra de solo. O valor pode variar entre 0,5 e 1,5 podendo atingir valores superiores a três para solos orgânicos.

### 3.1.9 Porosidade (n)

Porosidade é a relação entre o volume vazios do solo e o volume total de uma amostra. O intervalo de variação da porosidade está compreendido entre 0 e 1. Estes espaços vazios podem ser preenchidos por qualquer tipo de fluido (líquido ou gás). O valor da porosidade se expressa em porcentagem. Geralmente, os valores calculados situam-se entre 30% e 70%.

### 3.1.10 Ensaio de Permeabilidade

Segundo Conciani (2011), a permeabilidade pode ser estimada através do ensaio de coluna de duas maneiras: pela vazão do líquido percolado na coluna e pela medida de carga variável no mesmo, utilizando um piezômetro instalado na entrada do cilindro do ensaio em coluna, onde pode-se medir a altura piezométrica do fluido no momento de saturar a amostra.

O reservatório do fluido foi construído em fibra de vidro, por ser o material que apresentou o melhor comportamento para o lixiviado armazenado. Na Figura 3.6 são apresentados os detalhes do reservatório e do piezômetro.



Figura 3.6 – Detalhe do reservatório e o piezômetro.

### 3.1.11 Descrição dos Fluidos

No ensaio em coluna é necessário passar um fluido pela amostra. Neste caso, os fluidos utilizados foram água extraída de torneiras localizadas no Morro (comumente, utilizadas para consumo) e lixiviado em estado natural coletado nos tanques de armazenamento em Moravia. É importante destacar que o nível da água é praticamente similar ao nível de lixiviado presente no Morro. Na Figura 3.7, apresentam-se os tanques de armazenamento.

Segundo Sperling (2005) enumera como metais pesados os elementos: Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se e Zn. Estes elementos são encontrados naturalmente nos solos em concentrações variáveis, porém, são inferiores às consideradas tóxicas para diferentes organismos vivos, eles são  $As^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$  e  $Zn^{2+}$ , essenciais aos organismos em certas quantidades. Na composição do lixiviado, em função do alto grau de decomposição em que foi encontrado o lixo, verificou-se destaque nos teores de metais pesados, os contaminantes identificados nesta pesquisa foram obtidos em estudos realizados pela Universidade de Antioquia e pela Universidade de Catalunha. Foi verificada a presença de metais pesados, entre os quais estão: Mercúrio, Níquel, Cobalto, Cádmio, Cromo e Chumbo.

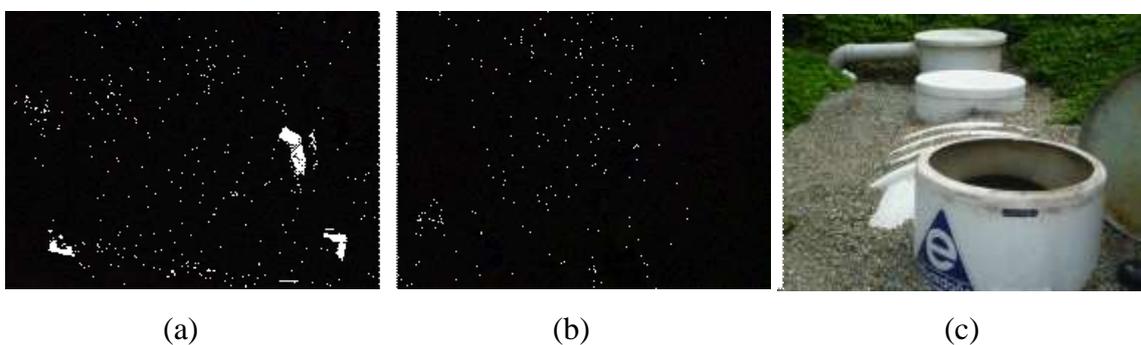


Figura 3.7 – Procedimento para extração do lixiviado: (a) Drenos horizontais; (b) Perfuração manual; (c) Tanques de armazenamento.

### 3.1.12 Análise Química

Esta análise foi feita usando a técnica de digestão ácida. Tal técnica é utilizada para reduzir a interferência que pode causar a presença de matéria orgânica nas amostras. Assim, o metal associado pode ser determinado por espectrofotometria de absorção atômica.

Inicialmente, as amostras foram agitadas e transferidas com volume 25 ml ao erlenmeyer. Logo, foram adicionados a cada amostra, 5 ml de ácido nítrico ( $HNO_3$ ), diluído (1:1) com

água destilada. As amostras foram levadas a evaporação em uma placa quente para reduzir o volume quase inteiramente impedindo a ebulição, depois foram arrefecidas. As paredes dos vasos foram lavadas com água destilada e filtraram-se com o filtro de papel 640 MN d Ø125 mm. Em finalização, o material filtrado foi transferido para um balão volumétrico e foi completado o volume inicial da amostra previamente recolhida para a análise.

A determinação dos metais por espectrofotometria de absorção atômica, foi efetuada em amostras obtidas após realizar a digestão ácida. As leituras das amostras foram feitas utilizando uma chama de Ar Acetileno no equipamento de espectrofotometria de absorção atômica Perkin Elmer 2380 ao respectivo comprimento de onda. As concentrações total dos elementos é dada em [mg/L] e os padrões utilizadas são de marca Merck Titrisol.

### **3.1.13 Ensaio em Coluna**

Foram realizados cinco ensaios em coluna no laboratório, para determinação da curva de chegada com o solo em sua condição natural, com dois fluidos afluentes O procedimento é semelhante ao empregado no ensaio de permeabilidade, conforme se apresenta na Figura 3.8.

Inicialmente o ensaio foi realizado com água da torneira para simular a água percolada em Moravia quando o Morro tinha moradores e também a água chuva, na atualidade é o único agente que contribui ao fluxo do contaminante para o rio, e representa a condição mais desfavorável. E o segundo fluido afluente foi lixiviado coletado no Morro. Além disso, os ensaios foram executados com um gradiente hidráulico de 8, para se assemelhar as condições as quais esta submetida a base do lixão.

Para evitar reações entre o fluido, o solo e o cilindro, estes foram construídos em acrílico, com diâmetro interno de 8 cm e altura de 11 cm. Os cilindros foram preenchidos com a amostra indeformada e foi adicionada parafina nas paredes para evitar os fluxos preferenciais, que acontecem na interface entre a célula e o solo, iniciou-se a saturação, até que um regime de fluxo permanente fosse atingido.

Em seguida, a solução contaminante, cuja concentração inicial é conhecida, foi permanentemente aplicada sobre a coluna durante o tempo de duração do ensaio, a solução foi armazenada no reservatório, este foi construído em fibra de vidro, deve-se proporcionar que a carga seja constante durante todo o ensaio.

Essa solução migra através da amostra impulsionada por imposição de gradiente hidráulico de 8. Amostras de efluentes drenados das colunas foram coletadas e as concentrações de solutos determinadas por procedimentos químicos padronizados.

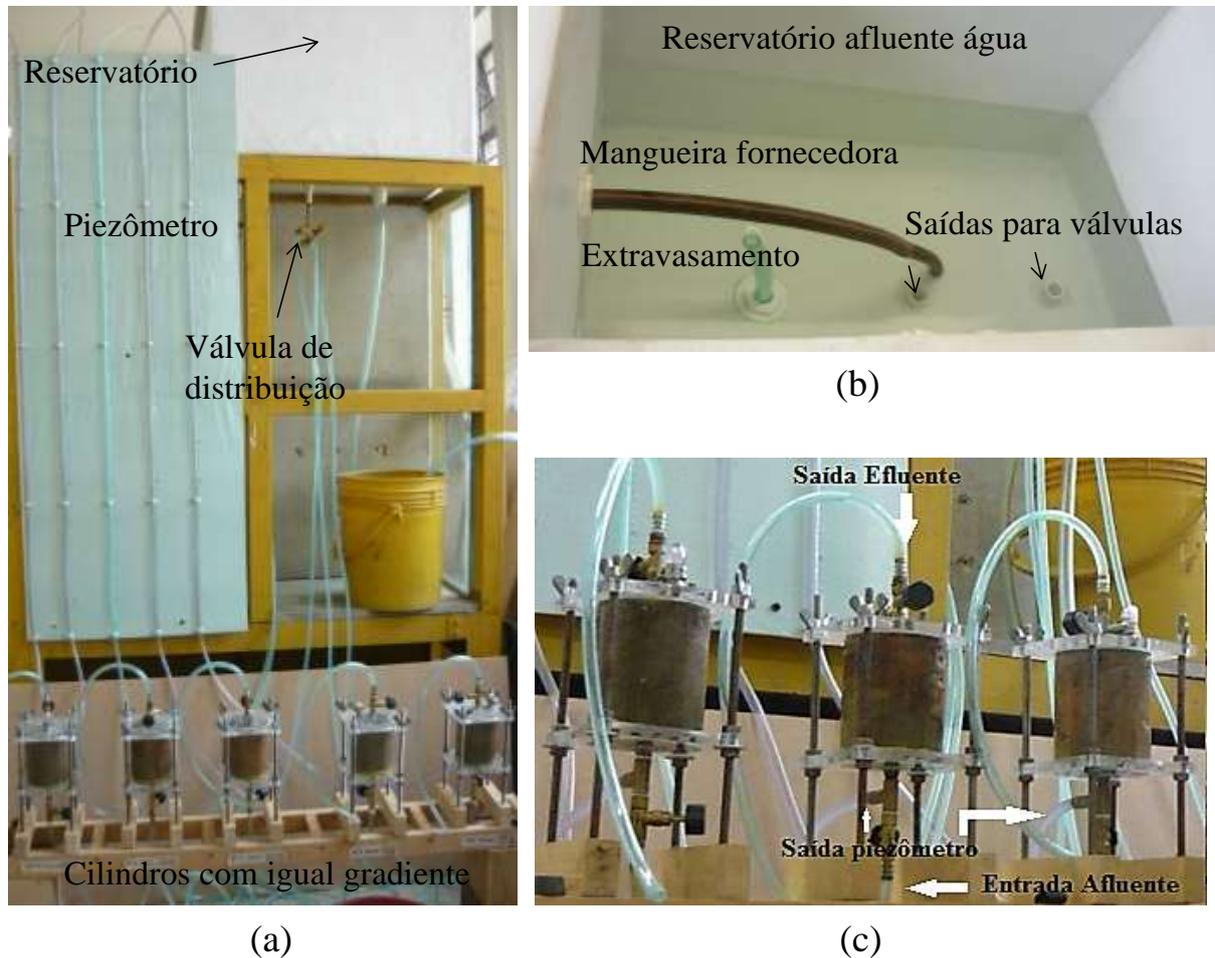


Figura 3.8 – Ensaio em coluna, em (a) equipamento para o ensaio, (b) reservatório, (c) válvulas e (d) amostras indeformadas.

Cada cilindro possui a entrada do afluyente na parte inferior, de modo que a saturação fosse ascendente, o fluido é regulado por uma válvula, depois desta se encontra a saída para o piezômetro, na parte superior do cilindro está a saída do efluente onde o liquido passa por uma mangueira e é coletado em frascos de 700 ml.

### 3.1.14 Ensaio de Sorção

Para este ensaio se utilizou o lixiviado natural (multiespécie) do Morro de Moravia. Este fluido foi produto da coleta das perfurações horizontais. As soluções foram preparadas com

diluições desse lixiviado variando as concentrações. Na Figura 3.9, apresenta-se o procedimento do ensaio de sorção.

As amostras deformadas de Moravia, foram secas ao ar e passadas pela peneira N° 10. Com este solo se fez a proporção solo:solução, esta última variando a sua concentração, com adição de água, este fluido foi usado para simular as condições de Moravia no laboratório porque água chuva é o fator mais importante que atua no Morro.

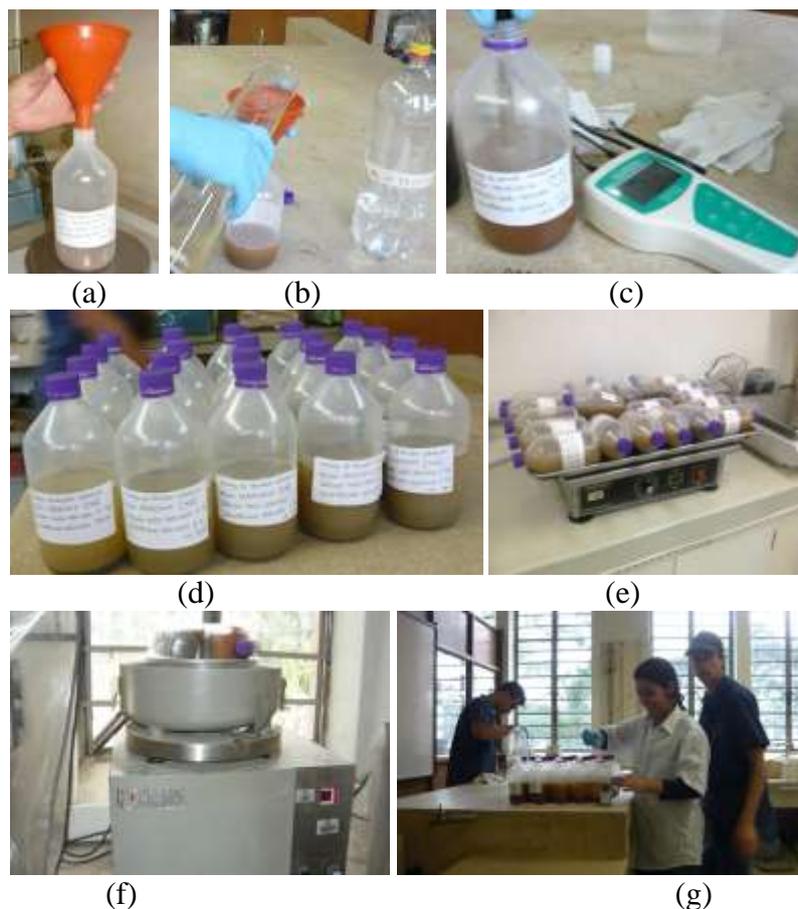


Figura 3.9 – Ensaio de sorção, em (a) passagem do solo, (b) adição da água destilada, (c) medição do pH, (d) amostras de sorção, (e) mesa vibratória, (f) centrífuga, (g) adição do nítrico ( $\text{HNO}_3$ ).

Foi realizado o ensaio de sorção com razão solo-solução (1:10) neste caso 50 g de solo e 500 ml de solução. Nesta solução foram variadas as concentrações de cada elemento na solução (1:1, 1:2, 1:4, 1:8, 1:16), sendo lixiviado:água.

De acordo com as normas do laboratório de química, a quantidade mínima de solução para ser analisada é de 450 ml. O ensaio é feito em triplicata para posteriormente se obter a média das

leituras e concluir o valor final das concentrações. Por esta razão, a quantidade de lixiviado tomada por amostra foi de 500 ml.

Depois de coletar as amostras efluentes mais solo, estas foram levadas ao Laboratório de Solos da Universidade Nacional de Colômbia onde foram agitadas por 24 horas.

No mesmo dia as garrafas foram levadas ao laboratório de Geotecnia e Pavimentação onde foram centrifugadas no extrato de asfalto (equipamento de pavimentação). Este equipamento foi utilizado porque não foi encontrado um extrator com uma capacidade suficientemente grande para centrifugar as amostras de 500 ml, para separação das fases.

Logo, as amostras foram filtradas em papel filtro qualitativo e tiveram a adição de ácido nítrico  $\text{HNO}_3$  ao 65% a fim de estabilizá-las. Esta substância foi fornecida pelo laboratório GDCON onde as amostras foram levadas para análise.

## **3.2 TRABALHO DE CAMPO**

### **3.2.1 Levantamento topográfico**

O levantamento topográfico consistiu em obter curvas de nível equidistantes em intervalo de 1 m e identificando áreas construídas, muros das casas, árvores, calçada, paredes internas de edificações, redes de energia, postes, caixas de inspeção e árvores existentes, incluindo identificação de espécies, maior altura e largura; adotando-se como referência as especificações técnicas sugeridas pela entidade Área Metropolitana do Valle de Aburrá.

A topografia da área oriental de Moravia foi realizada com teodolito, instrumento óptico utilizado para realizar medidas de ângulos verticais e horizontais, usado em redes de triangulação. Basicamente, trata-se de um telescópio montado sobre um tripé que permite movimentos graduados na vertical e na horizontal, possuindo uma bússola incorporada.

Este trabalho foi feito durante o mês de fevereiro de 2012 e complementou a topografia realizada em 2011, apresentando um ajuste perfeito nas dimensões. Na Figura 3.10 são ilustrados os equipamentos utilizados e procedimentos do trabalho de campo realizados em Moravia, no ano 2012.



Figura 3.10 – Trabalhos topográficos realizados no Morro em 2012 (a) setor oriental do Morro, (b) casas dos moradores, (c) setor sul do Morro.

### 3.2.2 Instrumentação geotécnica

Para monitorar algumas variáveis que controlam a estabilidade geotécnica do Morro, foram instalados piezômetros e inclinômetros. O acompanhamento regular das leituras dos referidos instrumentos permitiram a determinação do nível do lençol freático e dos possíveis deslocamentos que o Morro poderia apresentar, respectivamente.

Em 2009, o Instituto de Estudos de Infraestrutura (IEI) foi responsável pela implementação e execução do projeto denominado de Estudo Piloto para a Recuperação do Morro de Moravia. Na fase I, foram instalados quatro inclinômetros e dois piezômetros, sendo tais equipamentos destruídos em sua totalidade por vândalos, em fase imediata a complementação das leituras da primeira fase em 2009. Para avaliar as condições da instrumentação implementada no ano 2009, foi realizada uma inspeção de campo cujo resultado apontou para o funcionamento em bom estado de conservação de apenas dois inclinômetros, tendo sido observado que os demais equipamentos da instrumentação estavam completamente destruídos. Para os inclinômetros em bom estado de conservação foram contratados serviços de limpeza especializada e avaliação, cujos resultados indicaram que tais equipamentos não se encontravam em condições de funcionamento, por estarem colmatados em uma profundidade de 0,50 m. Como prováveis causas para o entupimento e obstrução da referida instrumentação pode-se citar a destruição das caixas de proteção da inclinometria e o descarte proposital de objetos, pedras e entulhos dentro de tubos da mesma, segundo evidências obtidas em trabalho de campo. Na Figura 3.11 pode-se observar o estado da instrumentação a partir da análise feita em 2009.

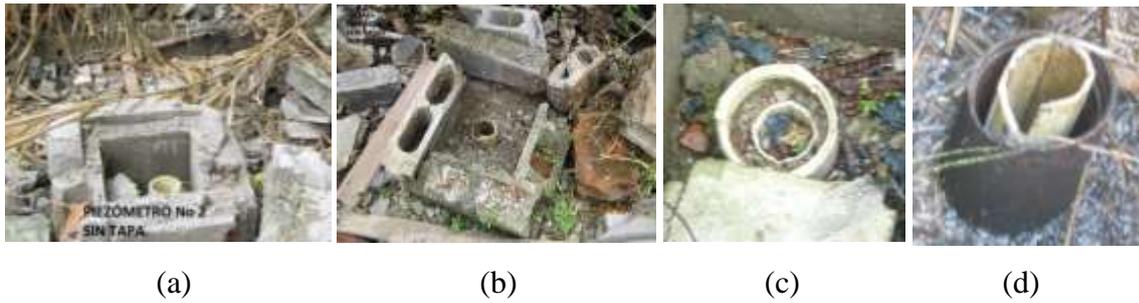


Figura 3.11 – Estado dos equipamentos instalados no ano 2009, (a) piezômetro dois sem tampa, (b) destruição da caixa de protecção, (c) instrumento entupido, (d) tubo quebrado.

No ano 2012 foram instalados os seguintes equipamentos: um inclinômetro (INC-03) e três piezômetros de corda vibrante, localizados na encosta oriental do Morro. Foram tomadas leituras semanalmente para monitorar o comportamento ao longo do tempo (Ordoñez, 2007).

### 3.2.2.1 Inclínometria

Para a substituição dos instrumentos destruídos decidiu-se contratar uma empresa especializada que realizou a perfuração, instalação e monitoramento para verificar o comportamento do inclinômetro INC-03 mediante leituras semanais. Este inclinômetro foi instalado na costa oriental do Morro a uma profundidade de 20,5 m. Na Figura 3.12 é ilustrado o procedimento de perfuração e instalação do inclinômetro INC-03

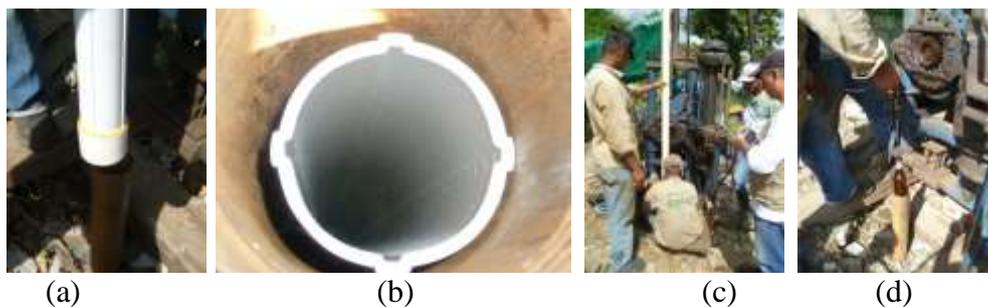


Figura 3.12 – Procedimento de perfuração e instalação do inclinômetro INC-03 em 2012, (a) revestimento da perfuração, (b) inserção do tubo, (c) encaixe da tubulação, (d) procurando o nível do lençol freático.

As leituras do equipamento foram realizadas em dois sentidos. O sentido A correspondente à direção perpendicular às curvas de nível, ou seja, ao sentido em que ocorrem os maiores movimentos. O sentido B foi delimitado na direção perpendicular ao anterior. As precisões aleatórias e totais do equipamento, respectivamente, são: 7,62 mm (0,3 polegadas) a 30,48 m

(100 pés) e 1,27 mm (0,05 polegadas) a 30,48 m (100 pés). Deve-se entender que quando as curvas de variação dos deslocamentos com a profundidade encontram-se dentro desta faixa, não é necessariamente recomendável concluir que houve deslocamentos reais do Morro.

### 3.2.2.2 Piezometria

As informações fornecidas pelos piezômetros de corda vibrante consistem basicamente nas poropressões geradas nos arredores do ponto exato de sua localização, ou seja, correspondem às pressões dos fluidos que estão nos espaços vazios existentes no solo ou nos resíduos. Com base nas poropressões se calculam as cargas hidráulicas e, a partir dessas, as cotas piezométricas. Foram instalados três piezômetros de corda vibrante, os quais foram denominados PZ-01, PZ-02 e PZ-03. Na Figura 3.13 apresenta-se o esquema dos piezômetros de corda vibrante construídos, e a título de demonstração, na Tabela 3.2, apresenta-se a calibração de um dos piezômetros instalados.

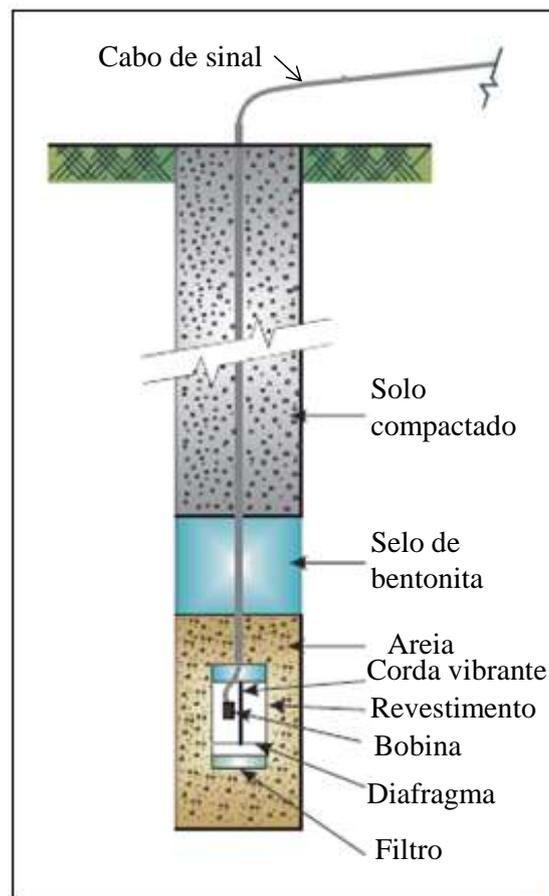


Figura 3.13 – Esquema do piezômetro de corda vibrante instalado, modificada de Geodataandina, (2008).

Tabela 3.2 – Calibração do piezômetro de Moravia 2012.

<b>Dados do Piezômetro</b>			
Alcance	750 kPa	Pressão Barométrica	99.5 kPa
Temperatura	22.6 °C	Comprimento do cabo	25 m

<b>Pressão aplicada kPa</b>	<b>Leitura linear unidade LU</b>	<b>Erro linear %FS</b>	<b>Erro Polinomial %FS</b>
0,00	3884,50	-0,24	-0,02
150,00	3594,50	0,00	-0,04
300,00	3303,10	0,16	-0,02
450,00	3009,30	0,15	-0,03
599,00	2714,60	0,06	0,02
750,00	2416,10	0,24	-0,02
749,00	2416,90	0,21	0,01
600,00	2714,20	0,05	0,00
450,00	3009,80	0,13	0,00
200,00	3303,80	0,19	0,02
160,00	3595,50	0,09	0,05
0,00	3885,00	-0,21	0,01
<b>Máximo erro</b>		0,24	0,06

Na Figura 3.14 é mostrado o processo de instalação do piezômetro. Observou-se uma grande dificuldade durante a perfuração para instalação do piezômetro, devido ao lixo encontrado até a profundidade desejada. Havia uma considerável variedade de resíduos no Morro, que geraram atrito com o equipamento aumentando a temperatura. Desta forma, o procedimento operacional tornou-se perigoso em função dos gases tóxicos e inflamáveis observados no lixão. Devido ao fato da perfuração adotada ter sido realizada com água, por questões de segurança, o nível de precisão do nível freático foi comprometido. Na Figura 3.15 apresenta-se a localização dos equipamentos, identificados como INC-03 para o inclinômetro, e PZ-01, PZ-02, e PZ-03 para os piezômetros de corda vibrante.

### 3.2.3 Ensaio de campo

A segunda metodologia consistiu em fazer um ensaio em grande escala. Este foi realizado no topo do Morro de Moravia. Ressalta-se que Moravia é um depósito de lixo e situa-se nas coordenadas 6°13'N/75°34'W, ao norte de Medellín, Antioquia, noroeste da Colômbia, ao longo da margem direita do Rio Medellín. Na Figura 3.16, pode-se observar a localização do campo experimental.

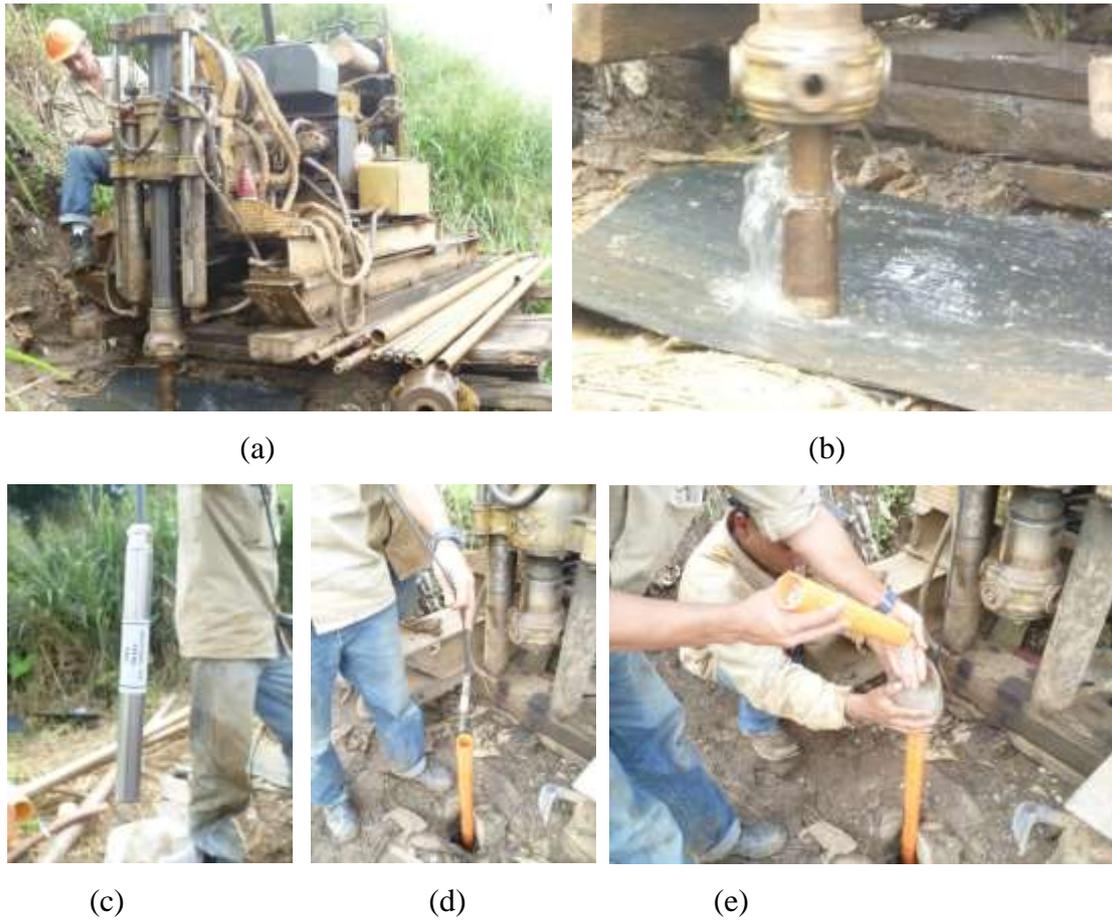


Figura 3.14 – Perfuração e instalação do inclinômetro INC-03 no ano 2012, em (a) equipamento, (b) perfuração com água, (c) piezômetro, (d) instalação do piezômetro. (e) adição de bentonita



Figura 3.15 – Localização dos equipamentos (Google Earth 2011 - sem escala).

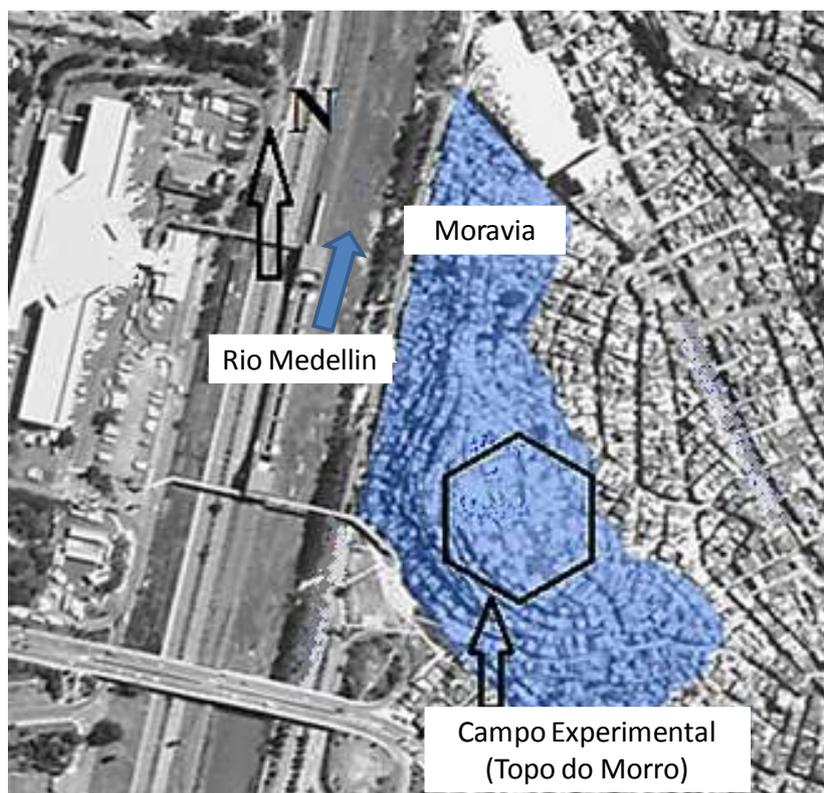


Figura 3.16 – Localização do campo experimental.

O lixão tem área de 7,6 ha e altura de 42,5 m. As encostas mostram valores médios de inclinação de  $10^\circ$  (direção norte-sul) e  $25^\circ$  (direção leste-oeste). Adotou-se a base do aterro como referência. O lençol freático localiza-se a uma profundidade de 19,8 m (maior valor reportado pelo Instituto de Estudios de Infraestructura, 2009).

O ensaio foi feito no topo do Morro e consistiu em dois experimentos P1 e P2 (um ao lado do outro). Em cada campo foi construído um poço e dentro dele se instalou um tanque de 0,6 m de diâmetro e 1 m de profundidade. O espaço externo do tanque foi preenchido com areia. A função principal do tanque era servir de reservatório da fonte de contaminação da solução predefinida que iria percolar. Cada tanque foi perfurado na base para se verificar o nível de lixiviação e quando preencher, filtrar o fluido que iria percolar pelo solo, os reservatórios foram preenchidos com água.

Além disso, foram realizados doze poços de observação com 5,08 cm (2 polegadas) de diâmetro, com profundidades variáveis, diametralmente distribuídos em duas filas, uma situadas em 3 m, e outra em 7 m dos reservatórios. Nas perfurações dos poços foram colocados tubos de PVC perfurados envolvidos em geotêxtil não tecido de alta condutividade

hidráulica, utilizados para coletar as amostras. Nas Figuras 3.17 e Figura 3.18. apresenta-se os esquemas do ensaios em campo e na Tabela 3.3 apresenta-se as profundidades dos poços.

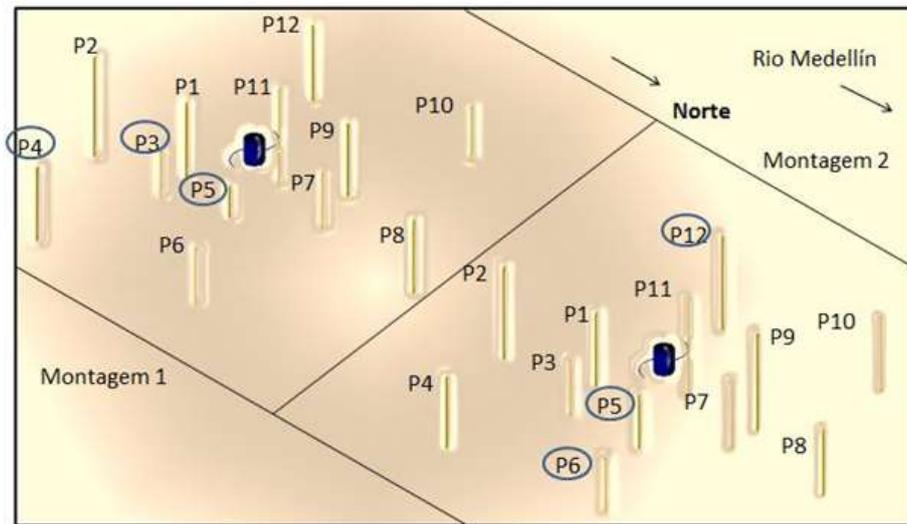


Figura 3.17 – Esquema dos montagens (nos poços com círculos azuis nunca teve fluido).



(a)

(b)



(c)

Figura 3.18 – Reservatório e poços de observação, (a) campo experimental, (b) reservatório, (c) poço de observação.

Tabela 3 – Profundidades dos poços de observação

Montagem 1												
Poços	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Prof (m)	3,20	4,30	2,00	3,13	1,37	2,28	2,39	3,14	3,04	2,25	4,00	3,20
Montagem 2												
Poços	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Prof (m)	3,17	4,00	2,36	2,99	2,27	2,24	2,85	2,85	4,10	3,15	4,00	4,00

Começou-se o ensaio no campo P1. Inicialmente foram coletadas amostras nos doze poços de observação no tempo zero, para conhecer as concentrações iniciais. Em seguida, o reservatório foi preenchido com água (foi feito só uma vez para cada montagem). Após a infiltração da água, novamente tomaram-se amostras nos doze poços de observação para os tempos 30 min, 1 h e 2 h. Simultaneamente, realizou-se o ensaio no campo experimental P2. Da mesma forma, coletaram-se amostras nos poços de observação. Tais amostras líquidas foi adicionado ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) e guardadas em um recipiente térmico com gelo e levadas ao laboratório de Solos da Universidade Nacional de Colômbia para medir as concentrações. A Figura 3.18 ilustra alguns passos desse processo.



Figura 3.19 – Ensaio em campo, (a) preenchimento do reservatório, (b) reservatório, (c) geotêxtil para proteger as perfurações no fundo de reservatório, (d),(e),(f),(g) poços de observação com amostras coletadas.

### **4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Neste capítulo, são apresentados e analisados os resultados dos ensaios feitos no laboratório e em campo, de acordo com as metodologias expostas no Capítulo 3.

#### **4.1 ENSAIOS DE LABORATÓRIO**

Nesta seção são apresentados os resultados da classificação das amostras utilizadas nos ensaios em coluna, e os respectivos resultados obtidos (M1 até M5). Também é realizada uma comparação das amostras coletadas após a realização dos ensaios em coluna, nos casos em que o fluido percolante foi a água coletada das torneiras de Moravia e no caso em que o fluido foi o próprio lixiviado, para cada metal analisado. Finalmente, são analisados os resultados do ensaio de sorção.

##### **4.1.1 Amostra M1**

###### **4.1.1.1 Classificação**

As amostras foram classificadas usando a norma D2487 (ASTM, 1969) do sistema unificado de classificação de solos (SUCS). Os solos são divididos em três grupos: solo granular, solo fino e solo de estrutura orgânica. Nesta classificação é necessário conhecer o limite de liquidez e o índice de plasticidade. Também foi usada a classificação HRB que além de usar o limite de liquidez e o índice de plasticidade, leva em conta a granulometria do solo. Na Tabela 4.1 são apresentados os dados do ensaio granulométrico da amostra M1. Na Figura 4.1, observa-se a curva granulométrica da amostra M1, a qual foi gerada a partir dos dados apresentados na Tabela 4.1.

Segundo a classificação D422 (ASTM 2007), da curva apresentada na Figura 4.1, se observam as porcentagens de solo que passam em cada peneira. No caso da amostra M1, observou-se 60 % de areia (solo retido entre 0,075 mm e 4,75mm) e 40 % de silte e argila (< 0,075 mm). A porcentagem de pedregulho é nula.

Tabela 4.1 – Dados do ensaio granulométrico da amostra M1.

Peneira ASTM No	Diâmetro dos grãos (mm)	Porcentagem que passa acumulado (%)
1"	25,400	100,0
3/4"	19,100	100,0
1/2"	12,700	100,0
3/8"	9,520	100,0
No. 4	4,760	100,0
No. 10	2,000	96,4
No. 20	0,840	87,5
No. 40	0,420	87,2
No. 60	0,250	73,3
No. 100	0,149	58,3
No. 140	0,105	49,0
No. 200	0,074	41,2
% Finos	--	40,3

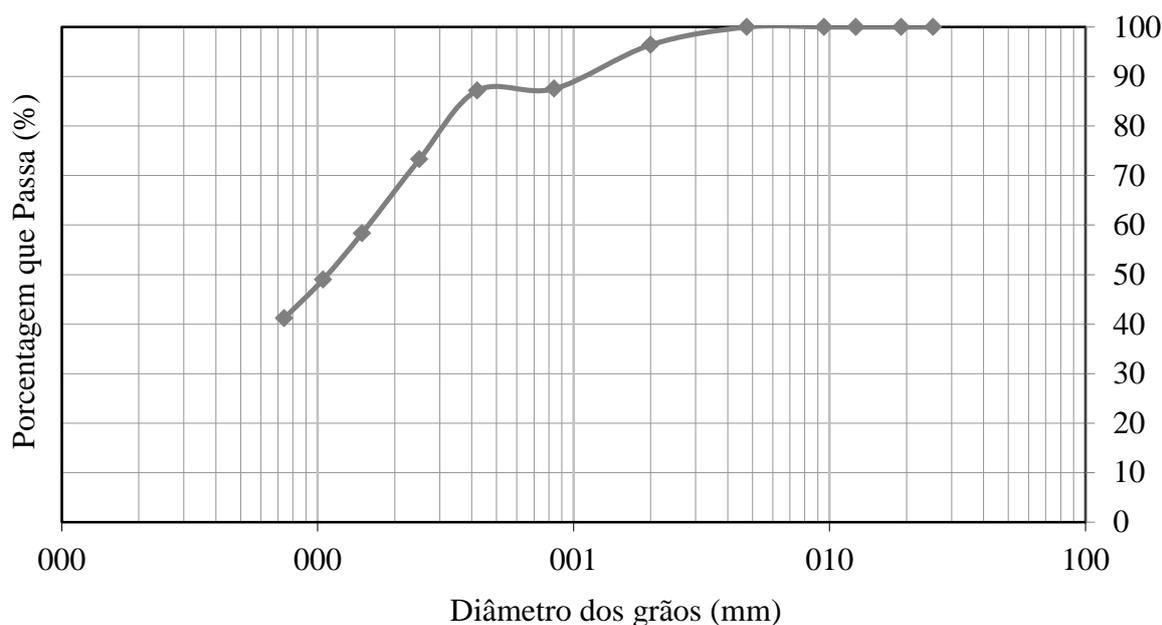


Figura 4.1 – Curva granulométrica da amostra M1 com defloculante.

Devido à alta porcentagem de areia na amostra, foi necessário fazer o ensaio de limite de liquidez utilizando o penetrômetro de cone. O limite de liquidez com este equipamento é obtido para uma penetração de 20 mm. Na Tabela 4.2 são apresentados os dados do ensaio de limite de liquidez para a amostra M1, e a respectiva curva é apresentada na Figura 4.2. Os pontos ajustados conduzem a um LL igual a 52 medido com a penetração de 20 mm.

Tabela 4.2 – Dados do ensaio de limite de liquidez da amostra M1.

Umidade (%)	Penetração (mm)
49,8	15,39
51,5	20,66
54,4	25,51

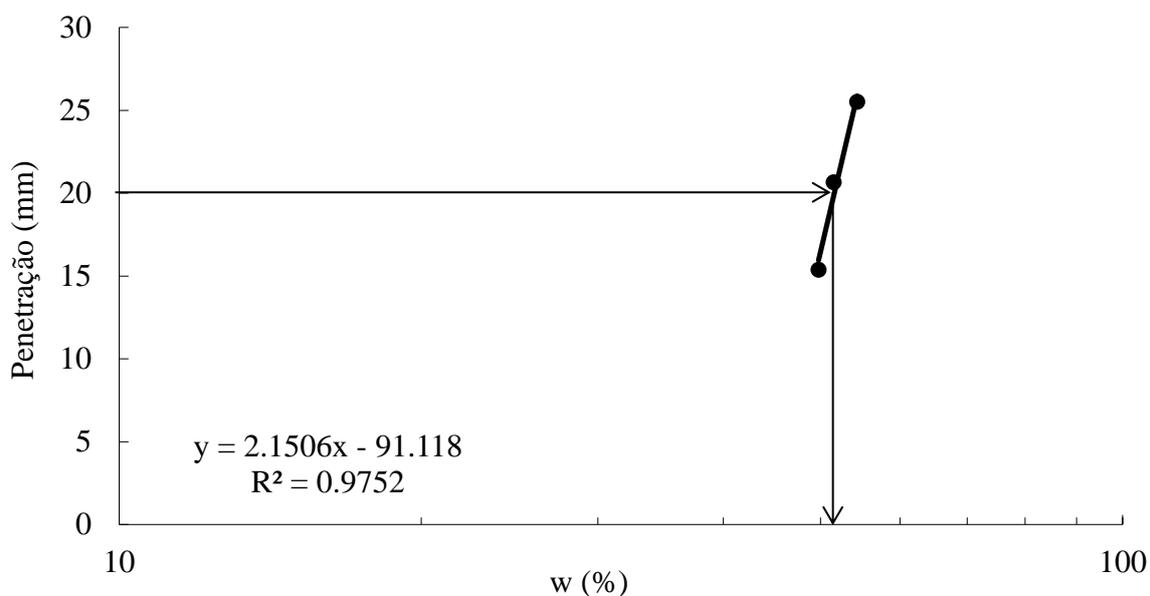


Figura 4.2 – Limite de liquidez da amostra M1.

Na Tabela 4.3 é apresentada a classificação da amostra M1, obtida a partir do ensaio granulométrico e do ensaio de limite de liquidez da amostra M1.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de classificação da amostra M1.

<b>Caracterização geotécnica do solo</b>		
	Ensaio	M1
	Teor de umidade (%)	38
Granulometria	Pedregulho (%)	0
	Areia (%)	60
	Argila (%)	40
Limites de Atterberg	Limite de liquidez (%)	52
	Limite de plasticidade (%)	38
	Limite de contração (%)	97
	Índice de plasticidade (%)	14
	Massa específica real dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,82
	Classificação USCS	OH
	Classificação HRB	A-7

A amostra M1 foi classificada pela SUCS como OH, ou seja, argilas e siltes orgânicos de alta a média plasticidade. Pela classificação HRB como A-7 e corresponde a um solo argiloso, que podem incluir misturas argilo-arenosas sujeitos a grandes variações volumétricas, bem como o solo A-6, porém mais elásticos, com alto limite de liquidez.

#### 4.1.1.2 Ensaio em Coluna

Na Tabela 4.4 e Tabela 4.5 são apresentados os dados e parâmetros do corpo de prova da amostra M1, utilizados no ensaio em coluna, respectivamente. O corpo de prova foi submetido ao gradiente hidráulico de 8. Este valor foi escolhido para fazer o modelo a escala do fenômeno e para simular as condições que se apresentam no Morro.

Tabela 4.4 – Dados do corpo de prova da amostra M1.

$D$ (cm)	$H$ (cm)	$Massa_{cp+cil}$ (g)	$Massa_{cil}$ (g)	$Massa_{cp}$ (g)	$M_s$ (g)	$M_w$ (g)	$V_{cp}$ (cm <sup>3</sup> )
7,9	10,62	905,04	157,39	747,65	735,59	12,06	520,56

Na Tabela 4.4,  $D$  é o diâmetro em [cm],  $H$  é a altura em [cm],  $M_{cp+cil}$  é a massa do corpo de prova mais a massa do cilindro [g],  $M_{cil}$  é a massa do cilindro [g],  $M_{cp}$  é a massa do corpo de prova [g],  $M_s$  é a massa de sólidos [g],  $M_w$  é a massa da água [g],  $V_{cp}$  é o volume do corpo de prova [cm<sup>3</sup>].

Tabela 4.5 – Parâmetros do corpo de prova da amostra M1.

$G_s$	$e$	$n$
2,82	1,00	0,50

pH	Temperatura °c	K (cm/s)
6,81	22,4	6,36E-05
7,12	23,6	2,69E-05
7,26	23,8	2,05E-05
7,3	23,8	2,72E-05

Na Tabela 4.5,  $G_s$  é a massa específica dos grãos do solo,  $w$  é a umidade [%],  $e$  é o índice de vazios e  $n$  é a porosidade, pH Potencial hidrogeniônico, K coeficiente de permeabilidade.

Na Tabela 4.6 são apresentados os resultados das concentrações finais para os três metais estudados (Cromo, Cádmio e Chumbo) quando a solução afluyente que percola a amostra M1 é água. O comportamento destes resultados é mostrado na Figura 4.3.

Tabela 4.6 – Concentrações de Cádmio<sup>+2</sup>, Chumbo<sup>+2</sup> e Cromo<sup>+3</sup> com água como afluente na amostra M1.

Água M1		Cádmio			Chumbo			Cromo		
V acum (cm <sup>3</sup> )	V/V <sub>v</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>
	0,000	0,001	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,014	0,000	0,000
700	2,695	0,001	0,003	3,000	0,002	0,019	9,500	0,014	0,050	3,571
1400	5,391	0,001	0,007	7,000	0,002	0,093	46,500	0,014	0,050	3,571
2100	8,086	0,001	0,003	3,000	0,002	0,010	5,000	0,014	0,050	3,571
2800	10,781	0,001	0,003	3,000	0,002	0,011	5,500	0,014	0,050	3,571

Na Tabela 4.6, V/V<sub>v</sub> é o volume acumulado em relação ao volume de vazios ou seja V<sub>p</sub> volume percolados e C/C<sub>0</sub> é a relação entre a medida da concentração no efluente e a medida da concentração no afluente.

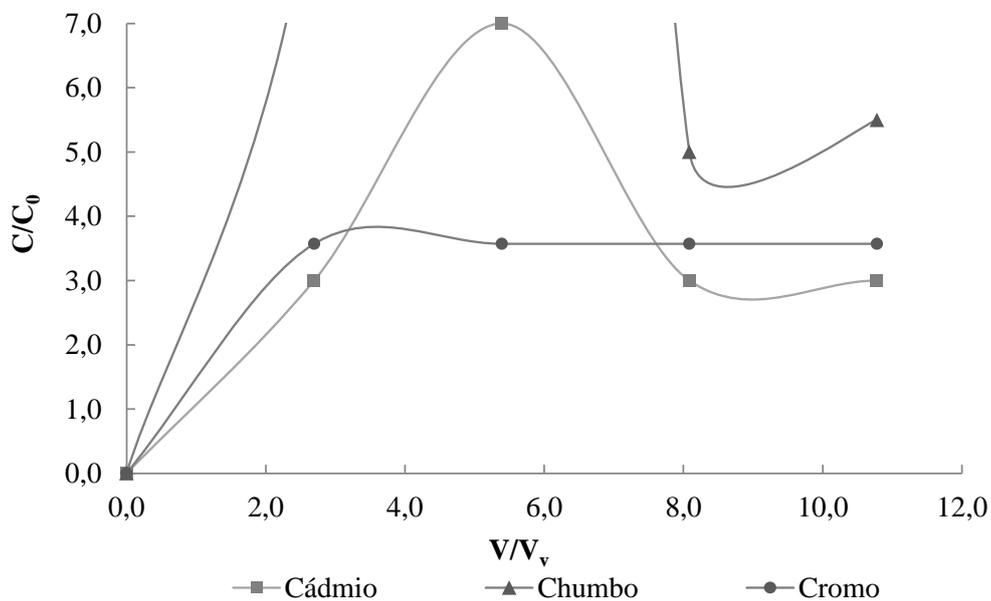


Figura 4.3 – Curvas de transporte com água como afluente da amostra M1.

Na Tabela 4.7 são apresentadas as concentrações quando a solução afluente que percola a amostra M1 é o lixiviado. As concentrações foram obtidas a partir do ensaio em coluna para os três metais analisados (Cromo, Cádmio e Chumbo). O comportamento destes resultados é mostrado na Figura 4.4.

Nas Figuras 4.3 e 4.4 pode-se observar o comportamento do Cádmio que atingiu o máximo valor. A concentração foi maior quando a solução que percolou foi água, alcançou o valor da relação C/C<sub>0</sub> de 7 e quando foi lixiviado 4,6. Este fenômeno, no qual a concentração efluente é maior que a concentração afluente, é denominado dessorção, ou seja, que o contaminante

retido inicialmente no solo com o tempo começou sair e foi transportado pelo soluto, é provável que o solo já estivesse contaminado.

Tabela 4.7 – Concentrações de Cromo, Cádmio e Chumbo e com lixiviado como afluente na amostra M1.

Lixiviado M1		Cádmio			Chumbo			Cromo		
V acum (cm <sup>3</sup> )	V/V <sub>v</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>
700	2,695	0,005	0,023	4,600	0,125	0,090	0,720	0,050	0,050	1,000
1400	5,391	0,005	0,010	2,000	0,125	0,083	0,664	0,050	0,050	1,000
2100	8,086	0,005	0,004	0,800	0,125	0,073	0,584	0,050	0,050	1,000
2800	10,781	0,005	0,004	0,800	0,125	0,080	0,640	0,050	0,050	1,000

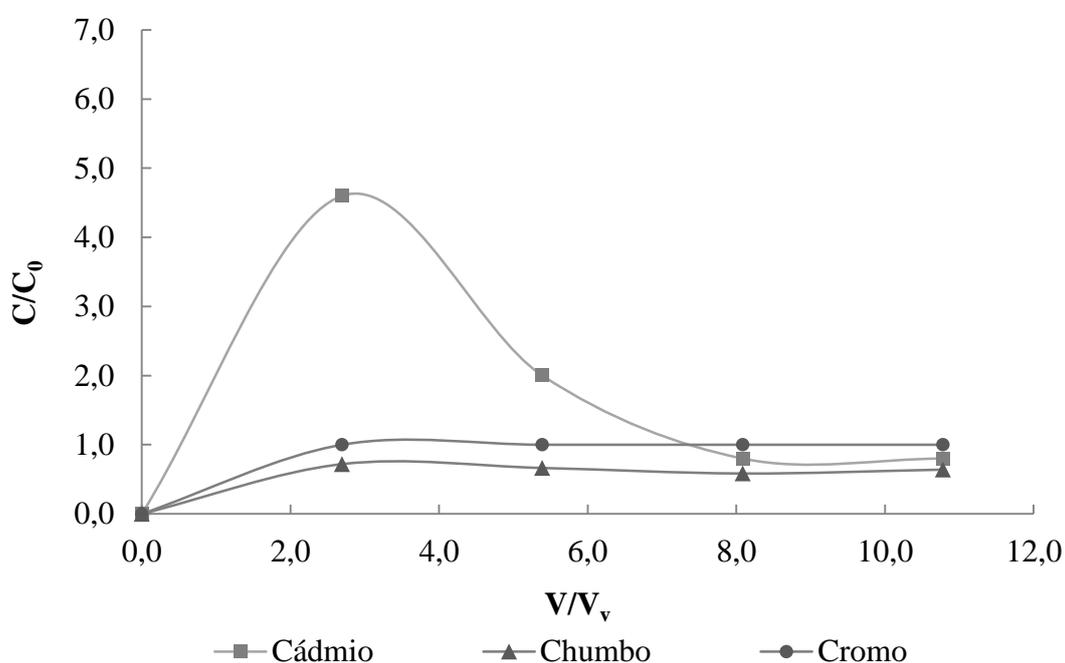


Figura 4.4 – Curvas de transporte com lixiviado como afluente da amostra M1.

Por outro lado, o Cromo foi estável nas duas soluções. Este metal apresentou um comportamento inicial de adsorção até ficar estável. E, finalmente, as concentrações do Chumbo foram maiores no afluente que no efluente, ou seja, é provável que tenha sido adsorvido.

Na Figura 4.5 são apresentadas as curvas de transporte dos metais, individualmente, quando é percolada água e lixiviado na amostra M1.

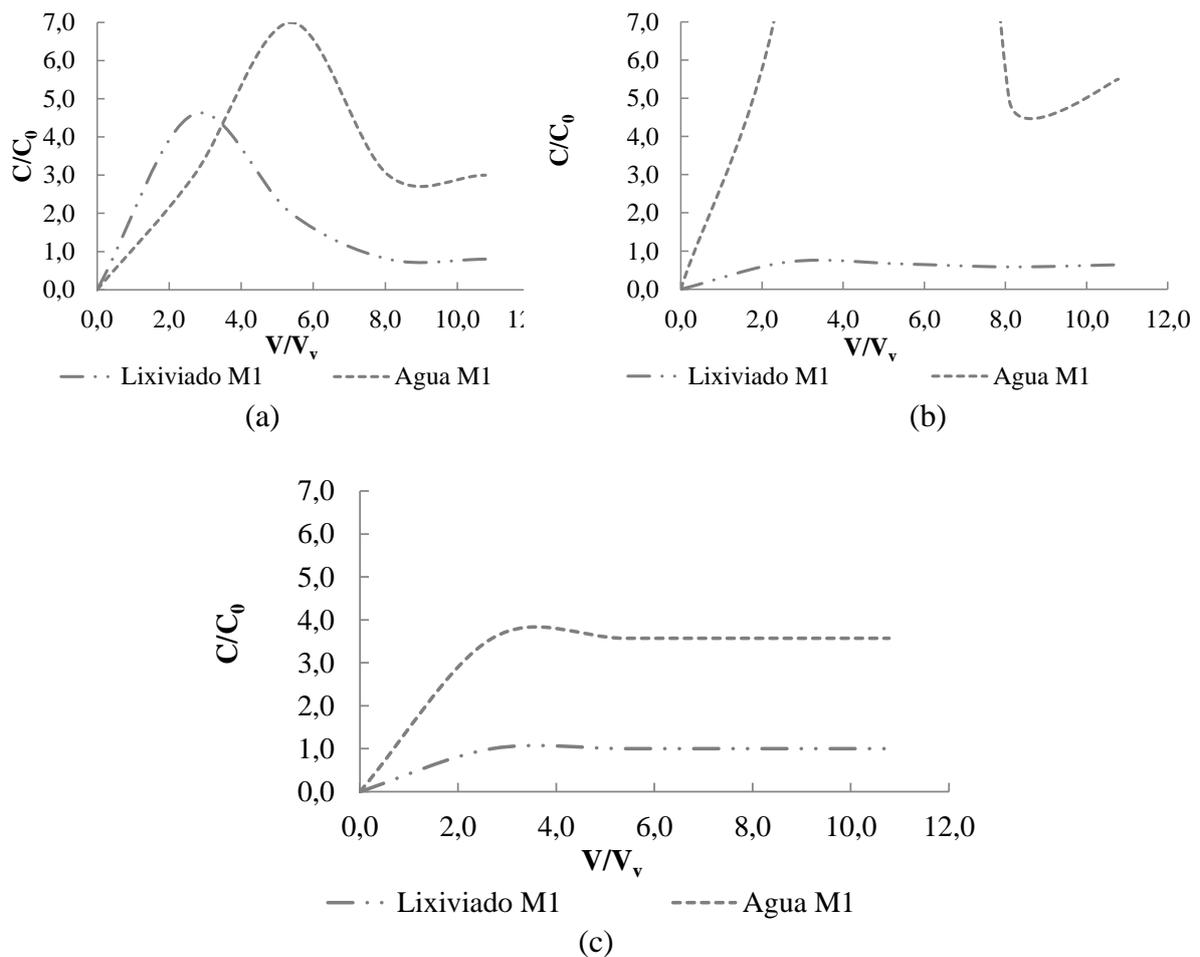


Figura 4.5 – Curvas de transporte (a) Cádmiio, (b) Chumbo, (c) Cromo em lixiviado e em água da amostra M1.

Na Figura 4.5(a) em relação às concentrações do Cádmiio no ensaio com lixiviado, percebe-se que a amostra tinha uma grande quantidade de Cádmiio sorvida. Isto pode ser percebido no volume de poros inicial. Com a continuidade do ensaio, o Cádmiio sofreu dessorção até ser transportado pelo soluto. Em (b) o Chumbo apresenta uma pequena diminuição constante durante o ensaio. Pode-se concluir que o Chumbo é transportado por mecanismos de advecção, dessorção e sofre sorção. Em (c) o Cromo apresenta um comportamento constante, o seja a concentração não tem variação.

Com isto se concluiu que o contaminante  $Cr^{+3}$  é transportado por advecção, ou seja a concentração inicial é igual a final. O fenômeno de sorção pode acontecer pela CTC. Nesta amostra o pH medido foi 6,81 a uma temperatura de de 22,4°C. Encontrado-se pH ácido, é um indicativo de que a solução apresenta íons em solução e estão sendo trocados por íons

positivamente carregados de alguma solução presente no solo, o que fez apresentar o fenômeno de sorção e fazer que as concentrações com a água sejam maiores, já que eles são dessorvidos.

#### 4.1.2 Amostra M2

##### 4.1.2.1 Classificação

Segundo a norma HRB, o solo desta amostra se classifica como A-7 por ter  $P_{200} = 59,1 > 35\%$  e  $LL = 57 > 40$  e  $IP = 26 > 10$  e corresponde a solo argiloso. Entretanto, segundo a norma SUCS, a amostra M2 é classificada como MH ou CH que corresponde a argilas/silte de alta compressibilidade. Na Tabela 4.8 são apresentados os dados do ensaio granulométrico da amostra M2.

Tabela 4.8 – Dados do ensaio granulométrico da amostra M2.

<b>Peneira ASTM No</b>	<b>Diâmetro dos grãos (mm)</b>	<b>Porcentagem que passa acumulado (%)</b>
1"	25,400	100,0
3/4"	19,100	100,0
1/2"	12,700	100,0
3/8"	9,520	100,0
No. 4	4,760	100,0
No. 10	2,000	83,3
No. 20	0,840	72,7
No. 40	0,420	72,6
No. 60	0,250	68,8
No. 100	0,149	65,1
No. 140	0,105	61,6
No. 200	0,074	59,1
% Finos	--	58,8

A Figura 4.6 mostra a curva granulométrica da amostra M2, a qual é gerada a partir dos dados apresentados na Tabela 4.7.

Para a amostra M2 de acordo com a quantidade de solo que passa nas peneiras, segundo a norma D 422 (ASTM, 2007), as porcentagens obtidas foram de 0% para pedregulho, 41% de areia e 59% de argila.

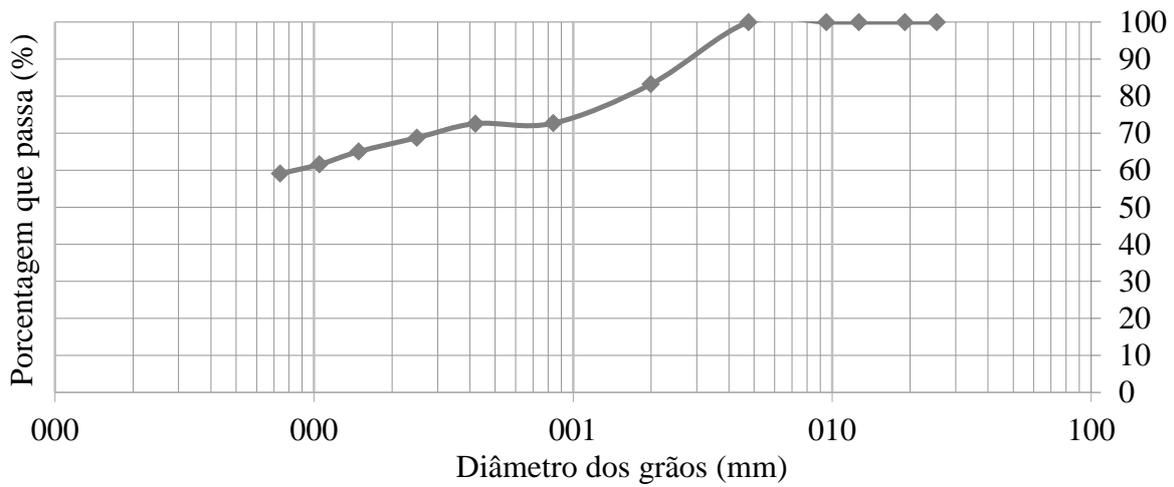


Figura 4.6 – Curva granulométrica do solo da amostra M2.

Este solo apresentou um comportamento plástico, por esta razão foi possível fazer o ensaio de liquidez no aparelho de casagrande. Na Tabela 4.9 são apresentados os dados do ensaio de limite de liquidez para a amostra M2, e sua respectiva curva é mostrada na Figura 4.7.

Tabela 4.9 – Dados do ensaio de limites de liquidez da amostra M2.

Umidade (%)	Número de golpes (N)
54	34
56	25
60	15

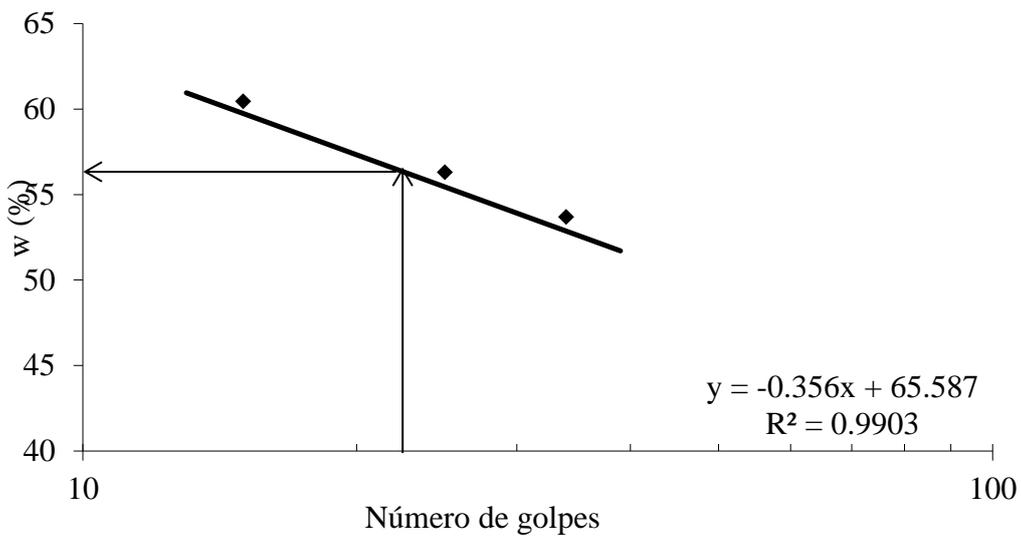


Figura 4.7 – Limite de liquidez da amostra M2.

Os pontos obtidos no ensaio ( $N^o$  de golpes versus umidade) se ajustam para um limite de liquidez (número de golpes = 25) igual a  $LL = 57\%$ .

Na Tabela 4.10 são mostrados os resultados dos ensaios de classificação da amostra M2. Estes são obtidos a partir do ensaio granulométrico e do ensaio de limite de liquidez da amostra M2.

Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios de classificação da amostra M2.

<b>Caracterização geotécnica do solo</b>		
	Ensaio	M2
	Teor de umidade (%)	36
Granulometria	Pedregulho (%)	0
	Areia (%)	41
	Argila (%)	59
Limites de Atterberg	Limite de liquidez (%)	57
	Limite de plasticidade (%)	31
	Limite de contração (%)	95,1
	Índice de plasticidade (%)	26
	Massa específica real dos grãos ( $g/cm^3$ )	2,49
	Classificação USCS	MH ou CH
	Classificação HRB	A-7

#### 4.1.2.2 Ensaio em Coluna

Na Tabela 4.11 e Tabela 4.12 são apresentados os dados e parâmetros do corpo de prova realizados na amostra M2.

Tabela 4.11 – Dados do corpo de prova da amostra M2.

$D$ (cm)	$H$ (cm)	$M_{cp+cil}$ (g)	$M_{cil}$ (g)	$M_{cp}$ (g)	$M_s$ (g)	$M_w$ (g)	$V_{cp}$ ( $cm^3$ )
7,9	10,62	871,26	163,1	708,16	682,5	25,66	520,56

Na Tabela 4.11,  $D$  é o diâmetro em [cm],  $H$  é a altura em [cm],  $M_{cp+cil}$  é a massa do corpo de prova mais a massa do cilindro [g],  $M_{cil}$  é a massa do cilindro [g],  $M_{cp}$  é a massa do corpo de prova [g],  $M_s$  é a massa de sólidos [g],  $M_w$  é a massa da água [g],  $V_{cp}$  é o volume do corpo de prova [ $cm^3$ ].

Tabela 4.12 – Parâmetros do corpo de prova da amostra M2

$G_s$	$e$	$n$
2,49	0,90	0,47

pH	Temperatura °c	K (cm/s)
7,61	22,3	1,15E-04
7,62	23,6	3,36E-05
7,68	23,7	2,97E-05
7,98	23,5	3,29E-05

Na Tabela 4.12,  $G_s$  é a massa específica dos grãos do solo,  $w$  é a umidade [%],  $e$  é o índice de vazios e  $n$  é a porosidade, pH Potencial hidrogeniônico, K coeficiente de permeabilidade

Na Tabela 4.13 são apresentados os resultados das concentrações para os três metais obtidos a partir do ensaio em coluna, quando a solução afluyente que percola a amostra M2 é água. O comportamento destes resultados é mostrado na Figura 4.8

Tabela 4.13 – Concentrações de Cádmio, Chumbo e Cromo com água como afluyente na amostra M2.

Água M2		Cádmio			Chumbo			Cromo		
V acum (cm <sup>3</sup> )	V/V <sub>v</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>
	0,000	0,001	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,014	0,000	0,000
700	2,840	0,001	0,004	4,000	0,002	0,030	15,000	0,014	0,050	3,571
1400	5,680	0,001	0,005	5,000	0,002	0,030	15,000	0,014	0,050	3,571
2100	8,521	0,001	0,003	3,000	0,002	0,027	13,500	0,014	0,050	3,571
2800	11,361	0,001	0,009	9,000	0,002	0,030	15,000	0,014	0,050	3,571

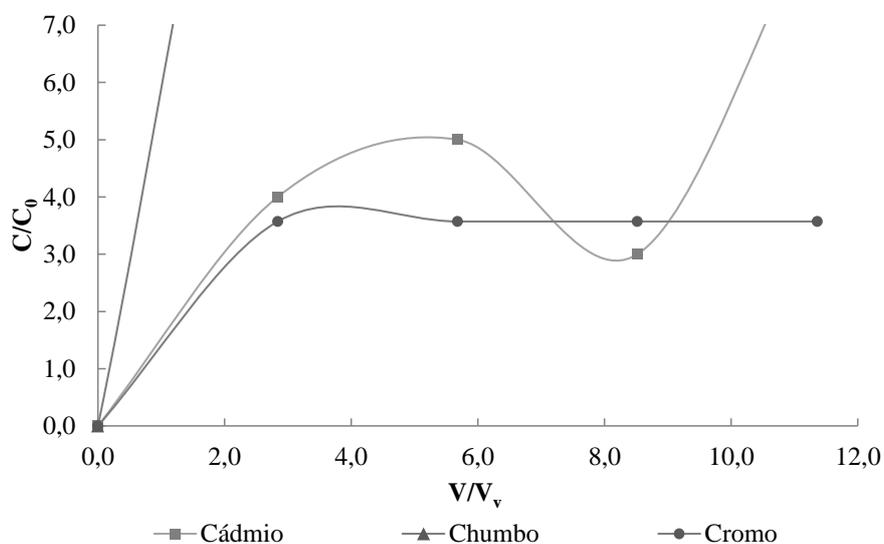


Figura 4.8 – Curvas de transporte com água como afluyente da amostra M2.

Na Tabela 4.14 são apresentados os resultados das concentrações para os três metais obtidos a partir do ensaio em coluna, quando a solução afluyente que percola a amostra M2 é lixiviado. O comportamento destes resultados é mostrado na Figura 4.9

Tabela 4.14 – Concentrações de Cádmio, Chumbo e Cromo com lixiviado como afluyente na amostra M2.

Lixiviado M2		Cádmio			Chumbo			Cromo		
V acum (cm <sup>3</sup> )	V/V <sub>v</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>
	0,000	0,005	0,000	0,000	0,125	0,000	0,000	0,050	0,000	0,000
700	2,840	0,005	0,015	3,000	0,125	0,087	0,696	0,050	0,050	1,000
1400	5,680	0,005	0,008	1,600	0,125	0,086	0,688	0,050	0,050	1,000
2100	8,521	0,005	0,003	0,600	0,125	0,078	0,624	0,050	0,050	1,000
2800	11,361	0,005	0,004	0,800	0,125	0,070	0,560	0,050	0,050	1,000

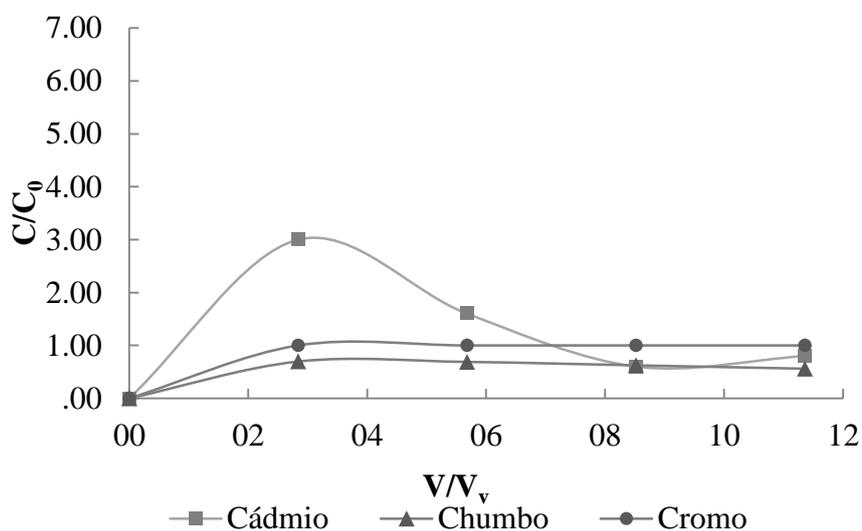


Figura 4.9 – Curvas de transporte com lixiviado como afluyente da amostra M2.

Na amostra M2 a concentração do Cádmio inicial é alta e vai diminuindo até o volume de poros 0,6 onde sofre um pequeno aumento ao final do ensaio, enquanto Chumbo e Cromo são estáveis.

O Chumbo e o Cromo apresentam um comportamento estável. Segundo Oyarzún (2007), quando o Cromo possui um valor de pH muito básico, ajuda o metal se movimentar em forma de ânion formando complexos solúveis.

Podem ser observadas na Figura 4.10, as curvas de transporte para Cádmiu, Chumbo e Cromo, usando como solução, lixiviado e água para a amostra M2.

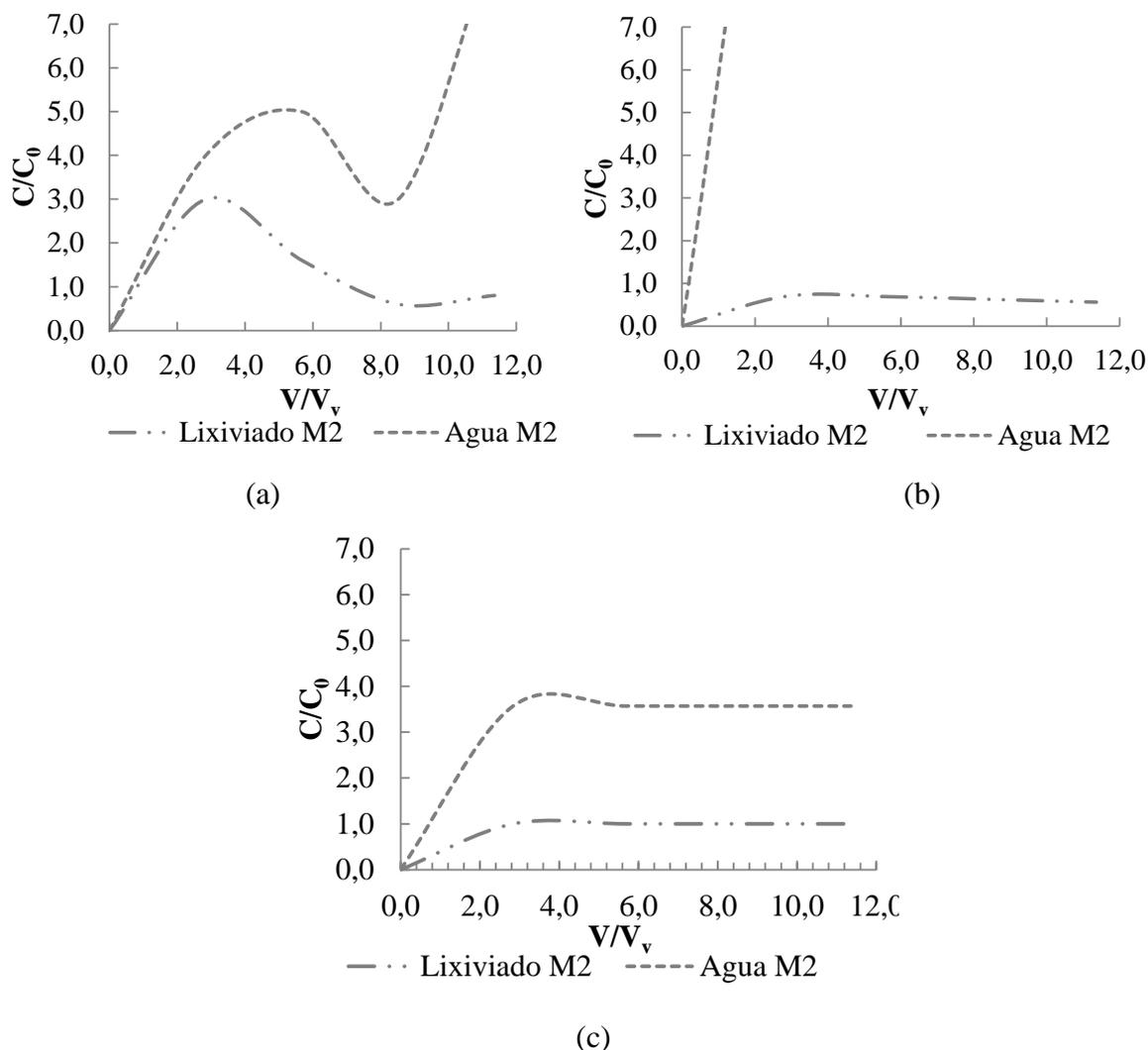


Figura 4.10 – Curvas de transporte (a) Cádmiu, (b) Chumbo, (c) Cromo em lixiviado e em água da amostra M2.

Nestas curvas o Chumbo e Cromo apresentam um comportamento estável, o que indica que não há variação na concentração, mostrando que é transportado por advecção. Enquanto o Cádmiu apresenta grandes variações, onde pode ocorrer sorção e desorção, e o volume de poros 2,8 e 5,6 atinge o valor  $C/C_0$  de 15 o Chumbo também apresenta este comportamento.

A amostra M2 é uma argila, apresenta uma permeabilidade de  $k = 3,33 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ , o pH de 7,62 e foi medido a uma temperatura de  $22,3^\circ\text{C}$ . Nas Figuras (a) e (c) podem-se observar o fenômeno do retardamento. Segundo Sousa (2004) este fenômeno é indicativo de fluxo

através de canais, com espécies químicas de elevada reatividade com o solo, além disso em (b) se apresenta dessorção.

### 4.1.3 Amostra M3

#### 4.1.3.1 Classificação

Segundo a norma USCS, a amostra M3 é classificada como OL, ou seja, silte orgânico de baixa plasticidade. E pela norma HRB o solo se classifica como A-2-4 por ter  $P_{200} = 23,8 < 35\%$  e  $LL = 34 < 40$  e  $IP = 3 < 10$  e corresponde a pedregulhos e areias siltosas ou argilosas. Na Tabela 4.15 são apresentados os dados do ensaio granulométrico da amostra M3.

Tabela 4.15 – Dados do ensaio granulométrico da amostra M3

<b>Peneira ASTM No</b>	<b>Diâmetro dos grãos (mm)</b>	<b>Porcentagem que passa acumulado (%)</b>
1"	25,400	100,0
3/4"	19,100	97,2
1/2"	12,700	86,1
3/8"	9,520	81,1
No. 4	4,760	74,3
No. 10	2,000	65,0
No. 20	0,840	55,7
No. 40	0,420	44,6
No. 60	0,250	37,2
No. 100	0,149	31,1
No. 140	0,105	26,4
No. 200	0,074	23,8
% Finos	--	22,7

A Figura 4.11 mostra a curva granulométrica da amostra M3, a qual é gerada a partir dos dados apresentados na Tabela 4.13. Com a curva da Figura 4.11 foram obtidas as seguintes porcentagens que passam em cada peneira de acordo ao diâmetro das partículas D422 (ASTM 2007) para a amostra M3, 26% de pedregulho, 51% de areia e 23% de argila.

Na Tabela 4.16 são apresentados os dados do ensaio de limite de liquidez para a amostra M3, e sua respectiva curva é mostrada na Figura 4.12.

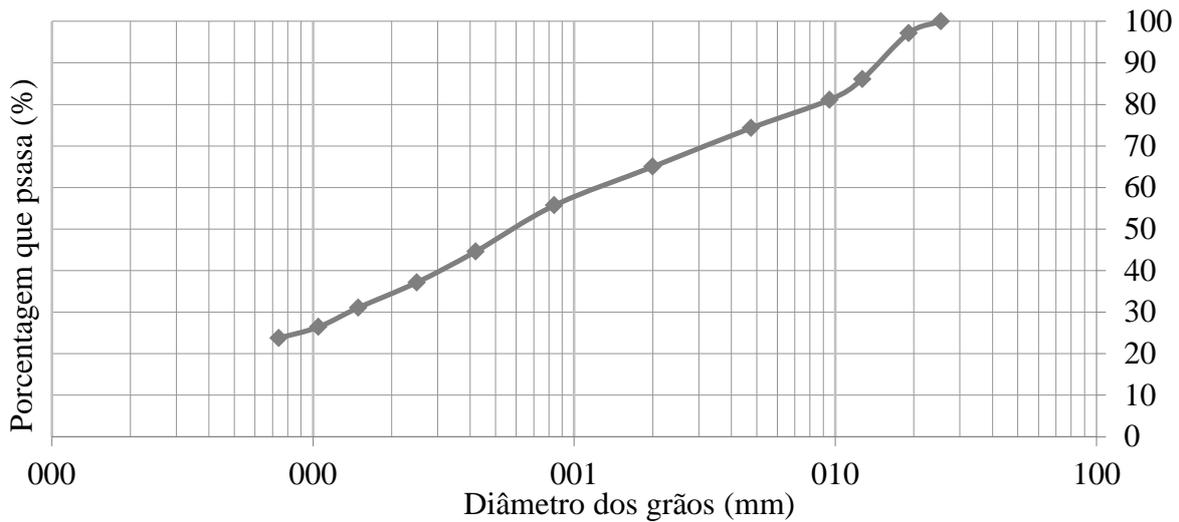


Figura 4.11 – Curva granulométrica do solo da amostra M3.

Tabela 4.16 – Dados do ensaio de limites de liquidez da amostra M3

Umidade (%)	Número de golpes (N)
31	35
34	25
36	15

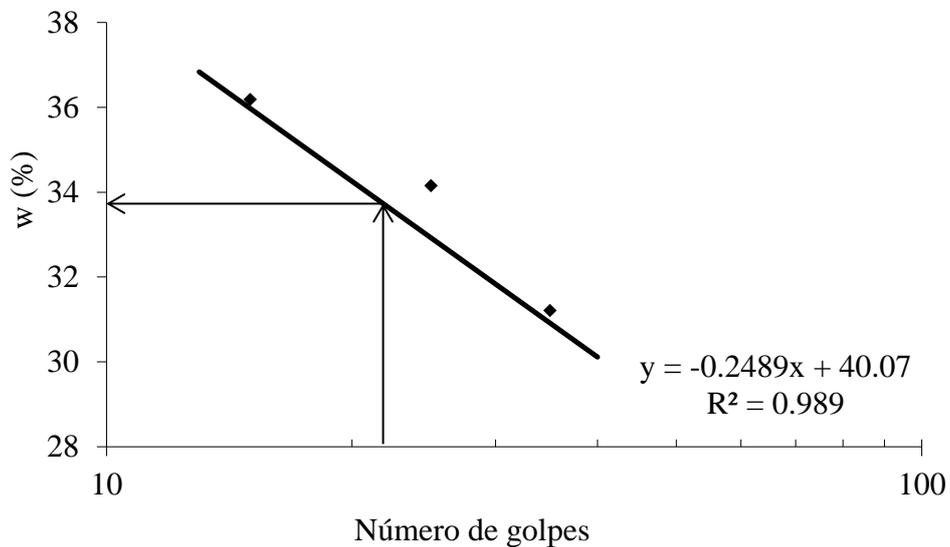


Figura 4.12 – Limite de liquidez da amostra M3.

Para a amostra M3, encontrou-se um limite de liquidez igual a 34%. O limite de liquidez é igual ao teor de umidade correspondente a 25 golpes.

Na Tabela 4.17 são mostrados os resultados dos ensaios de classificação da amostra M3. Estes são obtidos a partir do ensaio granulométrico e do ensaio de limite de liquidez da amostra M3

Tabela 4.17 – Resultados dos ensaios de classificação da amostra M3.

<b>Caracterização geotécnica do solo</b>		
Ensaio	M3	
Teor de umidade (%)	35	
Granulometria	Pedregulho (%)	26
	Areia (%)	51
	Argila (%)	23
Limites de Atterberg	Limite de liquidez (%)	34
	Limite de plasticidade (%)	31
	Limite de contração (%)	91,7
	Índice de plasticidade (%)	3
Massa específica real dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,62	
Classificação USCS	OL	
Classificação HRB	A-2-4	

#### 4.1.3.2 Ensaio em Coluna

Na Tabela 4.18 e Tabela 4.19 são apresentados os dados e parâmetros do corpo de prova respectivamente realizados na amostra M3.

Tabela 4.18 – Dados do corpo de prova da amostra M3.

$D$ (cm)	$H$ (cm)	$M_{cp+cil}$ (g)	$M_{cil}$ (g)	$M_{cp}$ (g)	$M_s$ (g)	$M_w$ (g)	$V_{cp}$ (cm <sup>3</sup> )
7,9	10,62	988,99	155,04	833,95	819,45	14,50	520,56

Na Tabela 4.18,  $D$  é o diâmetro em [cm],  $H$  é a altura em [cm],  $M_{cp+cil}$  é a massa do corpo de prova mais a massa do cilindro [g],  $M_{cil}$  é a massa do cilindro [g],  $M_{cp}$  é a massa do corpo de prova [g],  $M_s$  é a massa de sólidos [g],  $M_w$  é a massa da água [g],  $V_{cp}$  é o volume do corpo de prova [cm<sup>3</sup>].

Tabela 4.19 – Parâmetros do corpo de prova da amostra M3

$G_s$	$e$	$n$
2,62	0,66	0,40

pH	Temperatura °c	K (cm/s)
7,64	22,4	1,40E-04
7,57	23,9	5,37E-05
7,73	23,5	5,30E-05
7,5	23,9	4,06E-05

Na Tabela 4.19,  $G_s$  é a massa específica dos grãos do solo,  $w$  é a umidade [%],  $e$  é o índice de vazios e  $n$  é a porosidade, pH Potencial hidrogeniônico, K coeficiente de permeabilidade.

Na Tabela 4.20 são apresentados os resultados das concentrações para os três metais obtidos a partir do ensaio em coluna, quando a solução afluyente que percola a amostra M3 é água. O comportamento destes resultados é mostrado na Figura 4.13.

Tabela 4.20 – Concentrações de Cádmio, Chumbo e Cromo com água como afluyente na amostra M3.

Água M3		Cádmio			Chumbo			Cromo		
V acum (cm <sup>3</sup> )	V/V <sub>v</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>
	0,000	0,001	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,014	0,000	0,000
700	3,369	0,001	0,005	5,000	0,002	0,053	26,500	0,014	0,050	3,571
1400	6,738	0,001	0,008	8,000	0,002	0,043	21,500	0,014	0,050	3,571
2100	10,106	0,001	0,009	9,000	0,002	0,033	16,500	0,014	0,050	3,571
2800	13,475	0,001	0,003	3,000	0,002	0,029	14,500	0,014	0,050	3,571

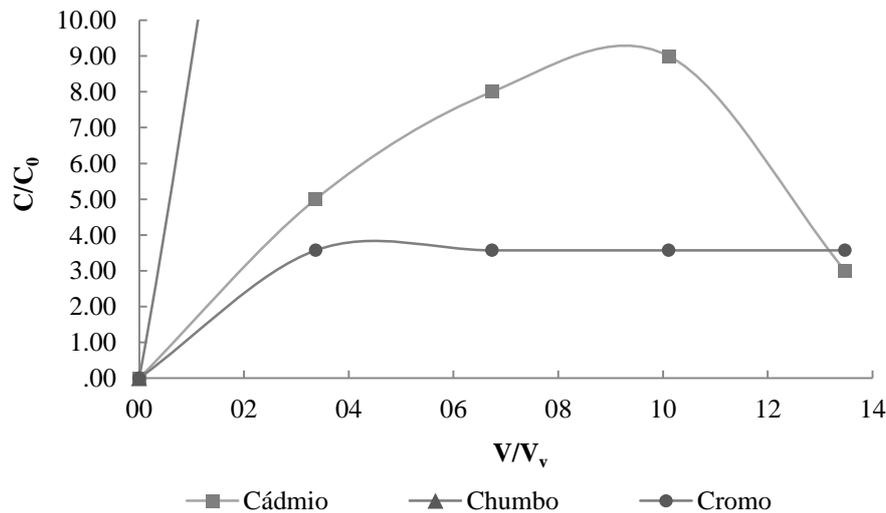


Figura 4.13 – Curvas de transporte com água como afluyente da amostra M3.

Na Tabela 4.21 são apresentados os resultados das concentrações para os três metais obtidos a partir do ensaio em coluna, quando a solução afluyente que percola a amostra M3 é lixiviado. O comportamento destes resultados é mostrado na Figura 4.14

Tabela 4.21 – Concentrações de Cádmio, Chumbo e Cromo com lixiviado como afluente na amostra M3.

Lixiviado M3		Cádmio			Chumbo			Cromo		
V acum (cm <sup>3</sup> )	V/V <sub>v</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>
	0,000	0,005	0,000	0,000	0,125	0,000	0,000	0,050	0,000	0,000
700	3,369	0,005	0,022	4,400	0,125	0,134	1,072	0,050	0,050	1,000
1400	6,738	0,005	0,009	1,800	0,125	0,107	0,856	0,050	0,050	1,000
2100	10,106	0,005	0,006	1,200	0,125	0,079	0,632	0,050	0,050	1,000
2800	13,475	0,005	0,008	1,600	0,125	0,115	0,920	0,050	0,050	1,000

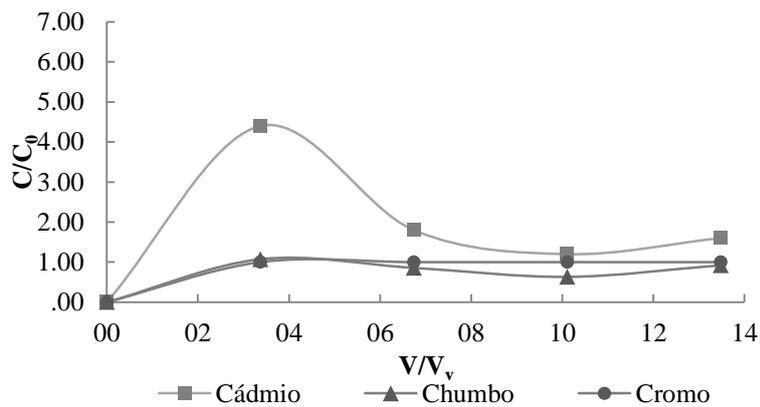


Figura 4.14 – Curvas de transporte com lixiviado como afluente da amostra M3.

Na Figura 4.13 o Chumbo apresenta uma concentração  $C/C_0$  de 26,5 mg/l para um volume de poros igual a 3,369. Esta é muito maior que quando se passa lixiviado pela amostra sendo a concentração  $C/C_0$  de 1,072, Figura 4.14. Com estes valores obtidos é provável que esta amostra esteja contaminada e quando o lixiviado percola por ela possivelmente não há reação. Com a percolação de água, esta leva parte do contaminante que a amostra contém, por esta razão a concentração final é maior em água.

Nesta amostra a curva do Cádmio continua apresentando dessorção, igual ao Chumbo, mas ao final, no volume de poros 3,369, tiveram um aumento nas concentrações gerando adsorção. Por outro lado o Cromo continuou com o processo advectivo.

Na Figura 4.15 são apresentadas as curvas de transporte dos metais individualmente quando é percolada água e lixiviado na amostra M3.

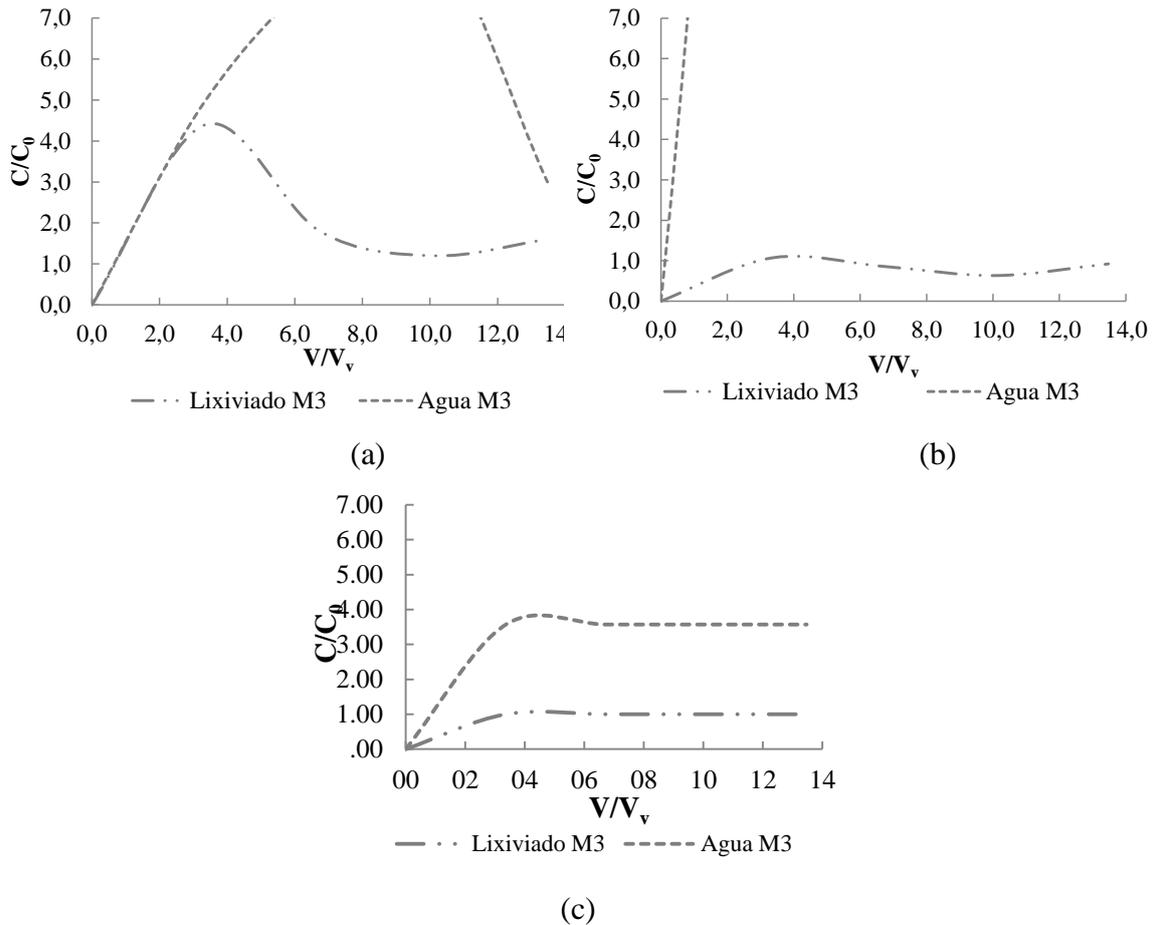


Figura 4.15 – Curvas de transporte (a) Cádmi, (b) Chumbo, (c) Cromo em lixiviado e em água da amostra M3.

O comportamento dos metais na amostra M3 foi caracterizado pelo seguinte: O Cádmi  $Cd^{2+}$  apresentou dessorção quando o líquido percolado foi lixiviado e adsorção quando o percolado foi água. Este comportamento corresponde a uma possível troca catiônica. A curva do Chumbo apresenta oscilações devido à influência dos fenômenos dispersivos e sorção. Finalmente, o Cromo continua sendo transportado pelo soluto no processo advectivo.

#### 4.1.4 Amostra M4

##### 4.1.4.1 Classificação

Segundo a norma USCS, a amostra M4 é classificada como OL, ou seja, silte orgânico de baixa plasticidade, e a norma HRB classifica esta amostra como A-2-6 por ter  $P_{200} = 14,9 < 35\%$  e  $LL = 40\%$  e  $IP = 11 > 10$  que corresponde pedregulho e areias siltosas ou argilas. Na Tabela 4.22 são apresentados os dados do ensaio granulométrico da amostra M4.

Tabela 4.22 – Dados do ensaio granulométrico da amostra M4.

Peneira ASTM No	Diâmetro dos grãos (mm)	Porcentagem que passa acumulado (%)
1"	25,400	93,1
3/4"	19,100	84,2
1/2"	12,700	78,5
3/8"	9,520	73,8
No. 4	4,760	66,1
No. 10	2,000	52,3
No. 20	0,840	40,6
No. 40	0,420	30,1
No. 60	0,250	24,1
No. 100	0,149	19,4
No. 140	0,105	16,0
No. 200	0,074	14,9
% Finos	--	14,7

A Figura 4.16 mostra a curva granulométrica da amostra M4, a qual é gerada a partir dos dados apresentados na Tabela 4.19.

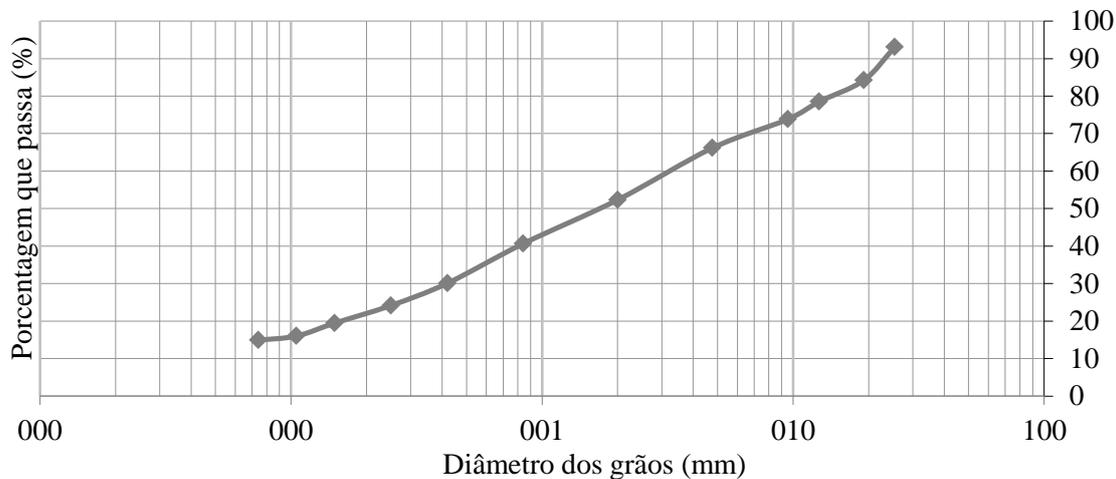


Figura 4.16 – Curva granulométrica do solo da amostra M4.

Da curva anterior são obtidas as porcentagens que passam em cada peneira de acordo ao diâmetro das malha da peneira D422 (ASTM 2007), neste caso a amostra M4 apresenta 34% pedregulho, 51% de areia e 15% de argila.

Na Tabela 4.23 são apresentados os dados do ensaio de limite de liquidez para a amostra M4, e sua respectiva curva é mostrada na Figura 4.17.

Tabela 4.23 – Dados do ensaio de limites de liquidez da amostra M4.

Umidade (%)	Penetração (mm)
37	15,22
40	20,73
41	22,92

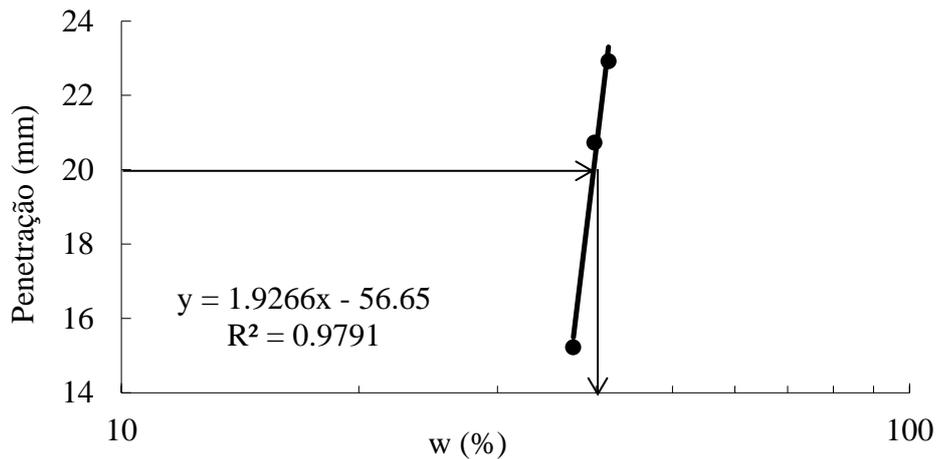


Figura 4.17 – Limite de liquidez da amostra M4.

Para a amostra M4 se encontrou um limite de liquidez igual a 40%. O limite de liquidez com o penetrômetro de cone é igual ao teor de umidade correspondente 20 mm de penetração. Na Tabela 4.24 são mostrados os resultados dos ensaios de classificação da amostra M4. Estes são obtidos a partir do ensaio granulométrico e do ensaio de limite de liquidez da amostra M4.

Tabela 4.24 – Resultados dos ensaios de classificação da amostra M4.

<b>Caracterização geotécnica do solo</b>		
	Ensaio	M4
	Teor de umidade (%)	18
Granulometria	Pedregulho (%)	34
	Areia (%)	51
	Argila (%)	15
Limites de Atterberg	Limite de liquidez (%)	40
	Limite de plasticidade (%)	29
	Limite de contração (%)	107,9
	Índice de plasticidade (%)	11
	Massa específica real dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,82
	Classificação USCS	OL
	Classificação HRB	A-2-6

#### 4.1.4.2 Ensaio em Coluna

Na Tabela 4.25 e Tabela 4.26 são apresentados os dados e parâmetros do corpo de prova realizados na amostra M4.

Tabela 4.25 – Dados do corpo de prova da amostra M4.

$D$ (cm)	$H$ (cm)	Massa $_{cp+cil}$ (g)	Massa $_{cil}$ (g)	Massa $_{cp}$ (g)	$M_s$ (g)	$M_w$ (g)	$V_{cp}$ (cm <sup>3</sup> )
7,9	10,62	912,57	168,14	744,43	733,07	11,36	520,56

Na Tabela 4.25,  $D$  é o diâmetro em [cm],  $H$  é a altura em [cm],  $M_{cp+cil}$  é a massa do corpo de prova mais a massa do cilindro [g],  $M_{cil}$  é a massa do cilindro [g],  $M_{cp}$  é a massa do corpo de prova [g],  $M_s$  é a massa de sólidos [g],  $M_w$  é a massa da água [g],  $V_{cp}$  é o volume do corpo de prova [cm<sup>3</sup>].

Tabela 4.26 – Parâmetros do corpo de prova da amostra M4

$G_s$	$e$	$n$
2,82	1,00	0,50

pH	Temperatura °c	K (cm/s)
7,66	22,4	1,98E-04
7,59	23,2	6,71E-05
7,55	23	6,93E-05
7,55	23,2	4,31E-05

Na Tabela 4.26,  $G_s$  é a massa específica dos grãos do solo,  $w$  é a umidade [%],  $e$  é o índice de vazios e  $n$  é a porosidade, pH Potencial hidrogeniônico, K coeficiente de permeabilidade.

Na Tabela 4.27 são apresentados os resultados das concentrações para os três metais obtidos a partir do ensaio em coluna, quando a solução afluyente que percola a amostra M4 é água. O comportamento destes resultados é mostrado na Figura 4.18.

Na Tabela 4.28 são apresentados os resultados das concentrações para os três metais obtidos a partir do ensaio em coluna, quando a solução afluyente que percola a amostra M4 é lixiviado. O comportamento destes resultados é mostrado na Figura 4.19.

Tabela 4.27 – Concentrações de Cádmio, Chumbo e Cromo com água como afluyente na amostra M4.

Água M4		Cádmio			Chumbo			Cromo		
V acum (cm <sup>3</sup> )	V/V <sub>v</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>
	0,000	0,001	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,014	0,000	0,000
700	2,686	0,001	0,003	3,000	0,002	0,017	8,500	0,014	0,050	3,571
1400	5,372	0,001	0,003	3,000	0,002	0,022	11,000	0,014	0,050	3,571
2100	8,058	0,001	0,003	3,000	0,002	0,032	16,000	0,014	0,050	3,571
2800	10,744	0,001	0,003	3,000	0,002	0,021	10,500	0,014	0,050	3,571

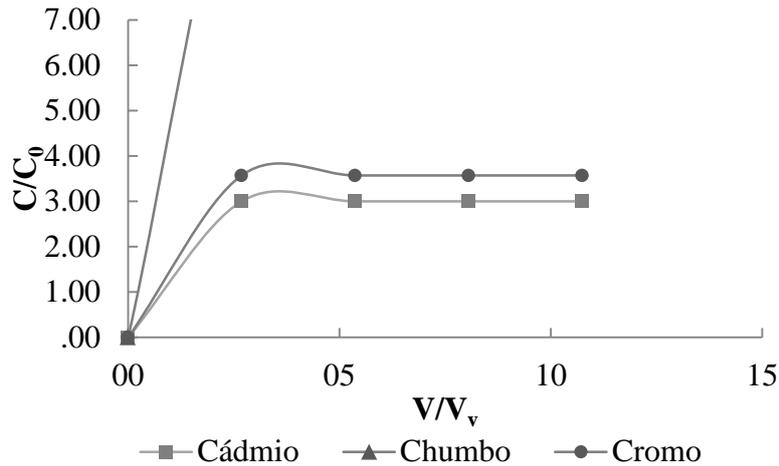


Figura 4.18 – Curvas de transporte com água como afluyente da amostra M4.

Na amostra M4 com água como percolado, os metais Cádmio e Cromo e com lixiviado como percolado Chumbo e Cromo, no volume de poros de 5,3, são transportados por advecção. Já que apresenta pouca ou nenhuma variação da concentração e continuam assim até depois do volume de poros em 10. Isto significa que, com a água os metais não sofrem grande influencia dos fenômenos de dispersão e sorção. Enquanto o Chumbo com água e o Cádmio com lixiviado apresenta dessorção, o Chumbo chegando a uma concentração de 16 no volume de poros de 8,058.

Tabela 4.28 – Concentrações de Cádmio, Chumbo e Cromo com lixiviado como afluyente na amostra M4.

Lixiviado M4		Cádmio			Chumbo			Cromo		
V acum (cm <sup>3</sup> )	V/V <sub>v</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>
	0,000	0,005	0,000	0,000	0,125	0,000	0,000	0,050	0,000	0,000
700	2,686	0,005	0,011	2,200	0,125	0,092	0,736	0,050	0,050	1,000
1400	5,372	0,005	0,004	0,800	0,125	0,095	0,760	0,050	0,050	1,000
2100	8,058	0,005	0,004	0,800	0,125	0,091	0,728	0,050	0,050	1,000
2800	10,744	0,005	0,004	0,800	0,125	0,096	0,768	0,050	0,050	1,000

Podem ser observadas na Figura 4.20 as curvas de transporte para Cádmiu, Chumbo e Cromo, usando como solução percolante lixiviado e água para a amostra M4.

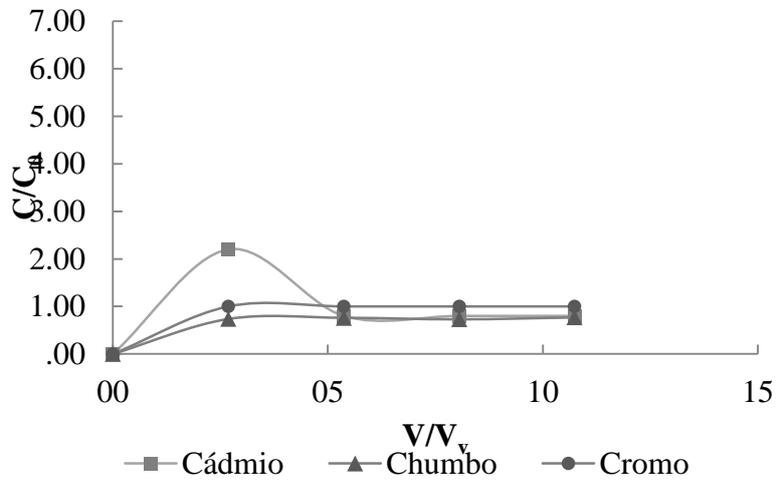


Figura 4.19 – Curvas de transporte com lixiviado como afluente da amostra M4.

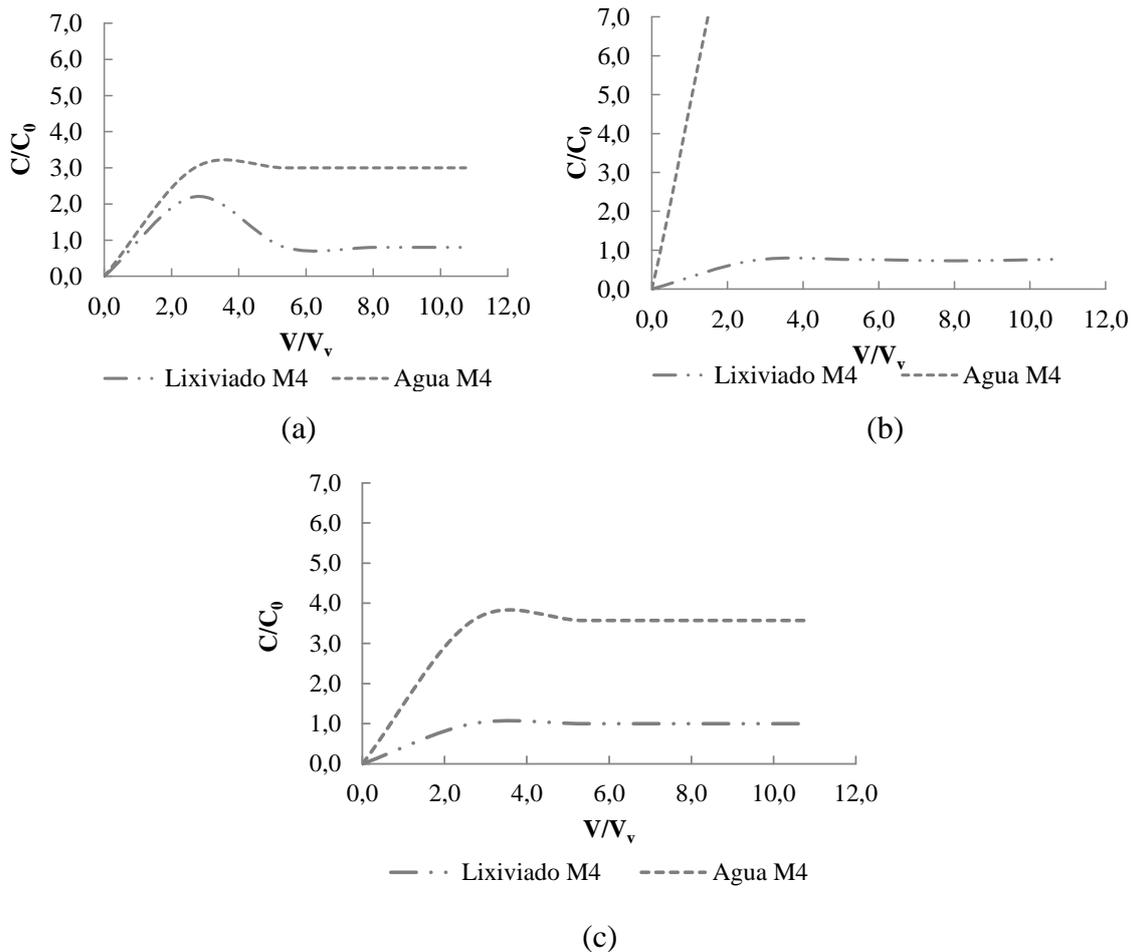


Figura 4.20 – Curvas de transporte (a) Cádmiu, (b) Chumbo, (c) Cromo em lixiviado e em água da amostra M4.

Observa-se na Figura 4.20 que a amostra M4 sofre fenômenos de dessorção quando a solução afluyente é lixiviado e processos advectivos quando a solução é água.

#### 4.1.5 Amostra M5

##### 4.1.5.1 Classificação

Segundo a norma HRB o solo desta amostra se classifica como A-2-6 por ter  $P_{200} = 4,8 < 35\%$  e  $LL = 37 < 40$  e  $IP = 11 > 10$  e corresponde a pedregulhos e areias siltosas ou argilas. Entretanto para a norma SUCS a amostra M2 é classificada como OL, silte orgânico de baixa plasticidade. Na Tabela 4.29 são apresentados os dados do ensaio granulométrico da amostra M5.

Tabela 4.29 – Dados do ensaio granulométrico da amostra M5.

<b>Peneira ASTM No</b>	<b>Diâmetro dos grãos (mm)</b>	<b>Porcentagem que passa acumulado (%)</b>
1"	25,40	100,0
3/4"	19,10	93,7
1/2"	12,70	82,6
3/8"	9,52	77,5
No. 4	4,76	67,3
No. 10	2,00	48,3
No. 20	0,84	37,3
No. 40	0,42	22,7
No. 60	0,25	18,5
No. 100	0,15	10,6
No. 140	0,105	5,7
No. 200	0,074	4,8
% Finos	--	3,1

A Figura 4.21 mostra a curva granulométrica da amostra M5, a qual é gerada a partir dos dados apresentados na Tabela 4.25. As porcentagens obtidas no ensaio para a amostra M5, D422 (ASTM 2007) foram 33% de pedregulho, 64% de areia e 3% de argila.

Na Tabela 4.30 são apresentados os dados do ensaio de limite de liquidez para a amostra M5, e sua respectiva curva é mostrada na Figura 4.22.

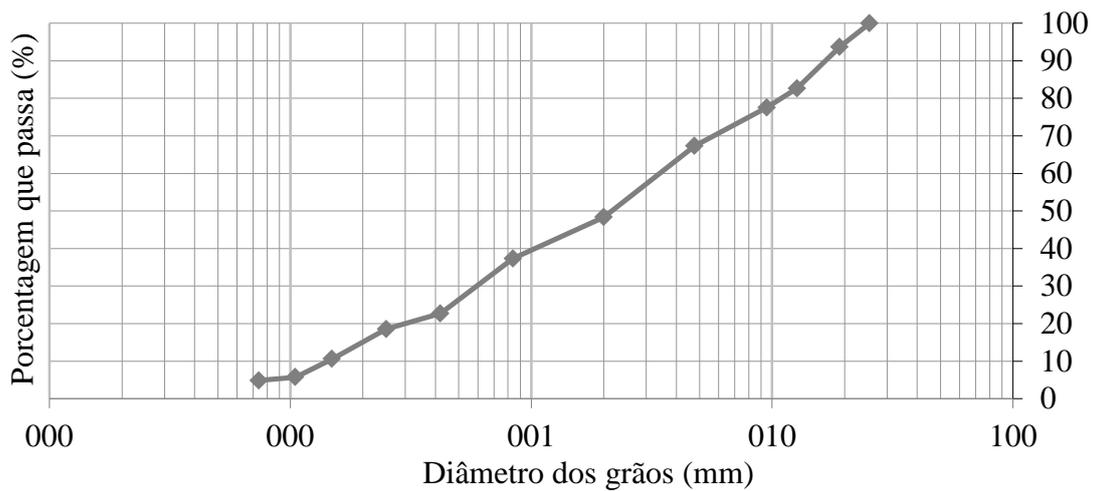


Figura 4.21 – Curva granulométrica do solo da amostra M5.

Tabela 4.30 – Dados do ensaio de limites de liquidez da amostra M5.

Umidade (%)	Penetração (mm)
34	15,08
37	19,63
39	24,96

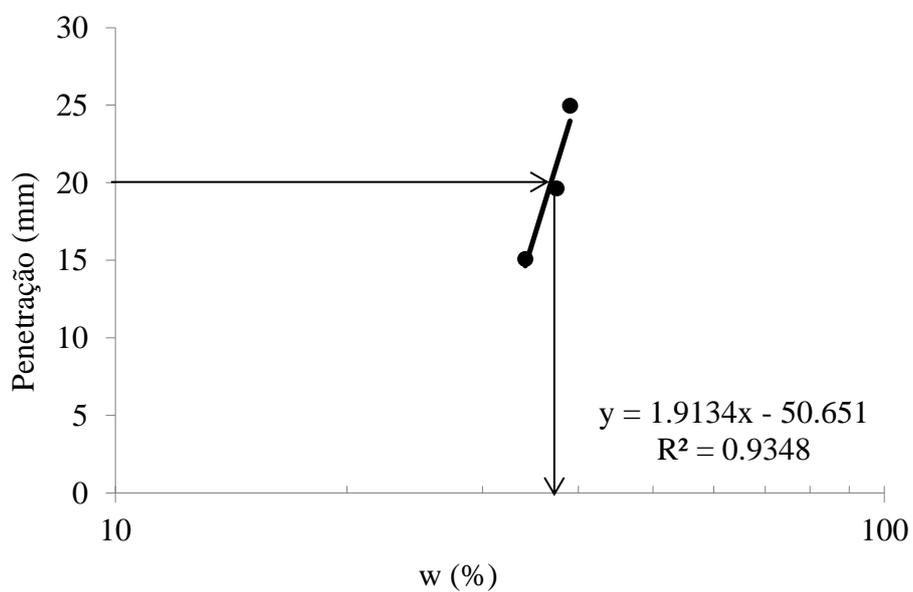


Figura 4.22 – Limite de liquidez da amostra M5.

A amostra M5 é silte orgânico com alto conteúdo de areia por esta razão o limite de liquidez foi feito com o cone, sendo obtido um limite de liquidez é igual a 37%.

Na Tabela 4.31 são mostrados os resultados dos ensaios de classificação da amostra M5. Estes são obtidos a partir do ensaio granulométrico e do ensaio de limite de liquidez da amostra M5.

Tabela 4.31 – Resultados dos ensaios de classificação da amostra M5.

<b>Caracterização geotécnica do solo</b>		
	<b>Ensaio</b>	<b>M5</b>
	Teor de umidade (%)	20
	Pedregulho (%)	33
Granulometria	Areia (%)	64
	Argila (%)	3
	Limite de liquidez (%)	37
Limites de Atterberg	Limite de plasticidade (%)	26
	Limite de contração (%)	103
	Índice de plasticidade (%)	11
	Massa específica real dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,27
	Classificação USCS	OL
	Classificação HRB	A-2-6

#### 4.1.5.2 Ensaio em Coluna

Na Tabela 4.32 e Tabela 4.33 são apresentados os dados e parâmetros do corpo de prova respectivamente realizados na amostra M5.

Tabela 4.32 – Dados do corpo de prova da amostra M5.

$D$ (cm)	$H$ (cm)	$M_{cp+cil}$ (g)	$M_{cil}$ (g)	$M_{cp}$ (g)	$M_s$ (g)	$M_w$ (g)	$V_{cp}$ (cm <sup>3</sup> )
7,9	10,62	1041,03	159,3	881,73	869,81	11,92	520,56

Na Tabela 4.32,  $D$  é o diâmetro em [cm],  $H$  é a altura em [cm],  $M_{cp+cil}$  é a massa do corpo de prova mais a massa do cilindro [g],  $M_{cil}$  é a massa do cilindro [g],  $M_{cp}$  é a massa do corpo de prova [g],  $M_s$  é a massa de sólidos [g],  $M_w$  é a massa da água [g],  $V_{cp}$  é o volume do corpo de prova [cm<sup>3</sup>].

Tabela 4.33 – Parâmetros do corpo de prova da amostra M5.

$G_s$	$e$	$n$
2,27	0,36	0,26

pH	Temperatura °c	K (cm/s)
7,44	22,7	1,98E-04
7,50	22,8	6,87E-05
7,50	22,9	7,92E-05
7,51	23,3	4,50E-05

Na Tabela 4.33,  $G_s$  é a massa específica dos grãos do solo,  $w$  é a umidade [%],  $e$  é o índice de vazios e  $n$  é a porosidade, pH Potencial hidrogeniônico, K coeficiente de permeabilidade.

Na Tabela 4.34 são apresentados os resultados das concentrações para os três metais obtidos a partir do ensaio em coluna, quando a solução afluyente que percola a amostra M5 é água. O comportamento destes resultados é mostrado na Figura 4.23.

Tabela 4.34 – Concentrações de Cádmiu, Chumbo e Cromo com água como afluyente na amostra M5.

Água M5		Cádmiu			Chumbo			Cromo		
V acum (cm <sup>3</sup> )	V/V <sub>v</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>
	0,000	0,001	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,014	0,000	0,000
700	5,095	0,001	0,003	3,000	0,002	0,014	7,000	0,014	0,050	3,571
1400	10,191	0,001	0,007	7,000	0,002	0,081	40,500	0,014	0,050	3,571
2100	15,286	0,001	0,007	7,000	0,002	0,088	44,000	0,014	0,050	3,571
2800	20,381	0,001	0,003	3,000	0,002	0,010	5,000	0,014	0,050	3,571

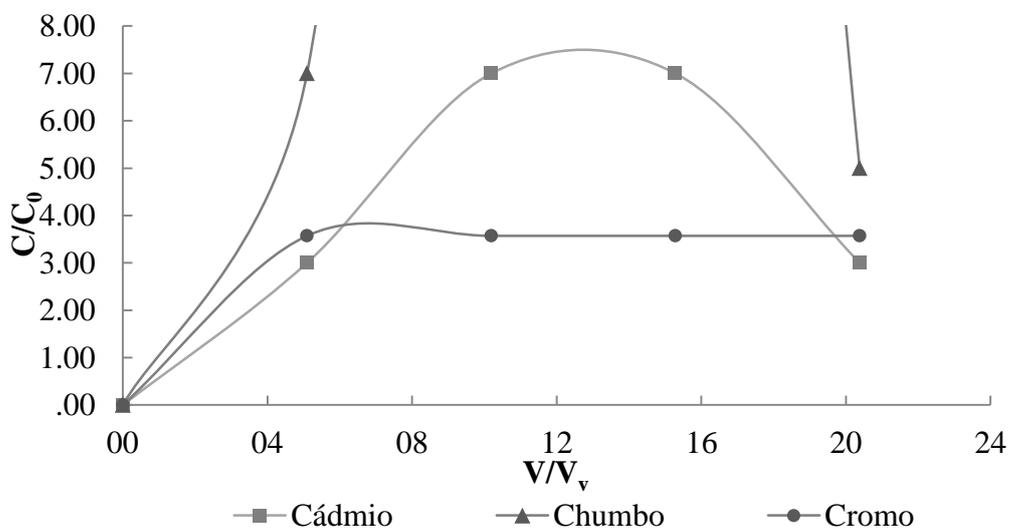


Figura 4.23 – Curvas de transporte com água como afluyente da amostra M5.

Na Tabela 4.35 são apresentados os resultados das concentrações para os três metais obtidos a partir do ensaio em coluna, quando a solução afluyente que percola a amostra M5 é lixiviado. O comportamento destes resultados é mostrado na Figura 4.24.

Tabela 4.35 – Concentrações de Cádmio, Chumbo e Cromo com lixiviado como afluyente na amostra M5.

Lixiviado M5		Cádmio			Chumbo			Cromo		
V acum (cm <sup>3</sup> )	V/V <sub>v</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> (mg/l)	C (mg/l)	C/C <sub>0</sub>
	0,000	0,005	0,000	0,000	0,125	0,000	0,000	0,050	0,000	0,000
700	5,095	0,005	0,018	3,600	0,125	0,090	0,720	0,050	0,050	1,000
1400	10,191	0,005	0,007	1,400	0,125	0,086	0,688	0,050	0,050	1,000
2100	15,286	0,005	0,005	1,000	0,125	0,092	0,736	0,050	0,050	1,000
2800	20,381	0,005	0,005	1,000	0,125	0,091	0,728	0,050	0,050	1,000

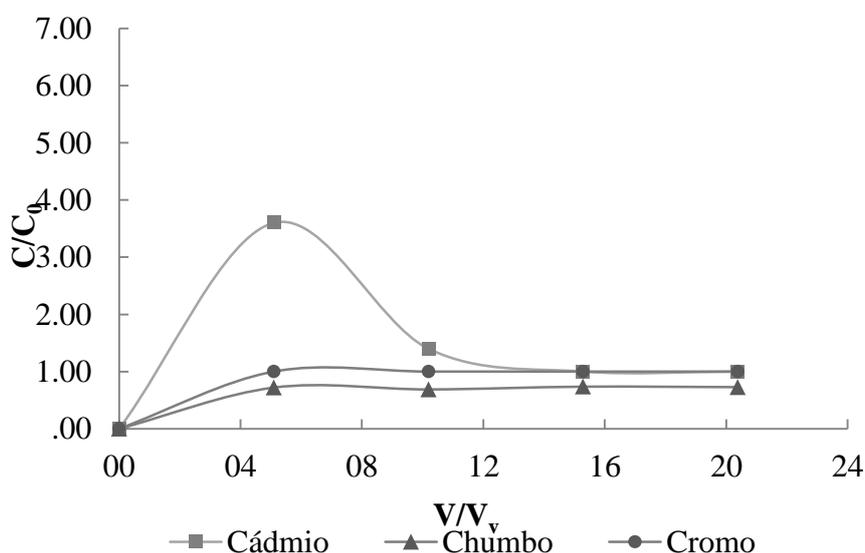


Figura 4.24 – Curvas de transporte com lixiviado como afluyente da amostra M5.

Nesta amostra, quando o solo é percolado com água, o Cádmio e o Chumbo apresentam o mesmo comportamento em concentrações proporcionais, enquanto o Cromo permanece estável.

Nas curvas com afluyente lixiviado, o Cádmio apresenta dessorção até o volume de poros 4, onde começa o fenômeno advectivo. No mesmo valor de poros acontece um comportamento similar com o Chumbo e o Cromo.

À seguir, podem ser observadas na Figura 4.25, as curvas de transporte para Cádmiu, Chumbo e Cromo, usando como solução lixiviado e água para a amostra M5.

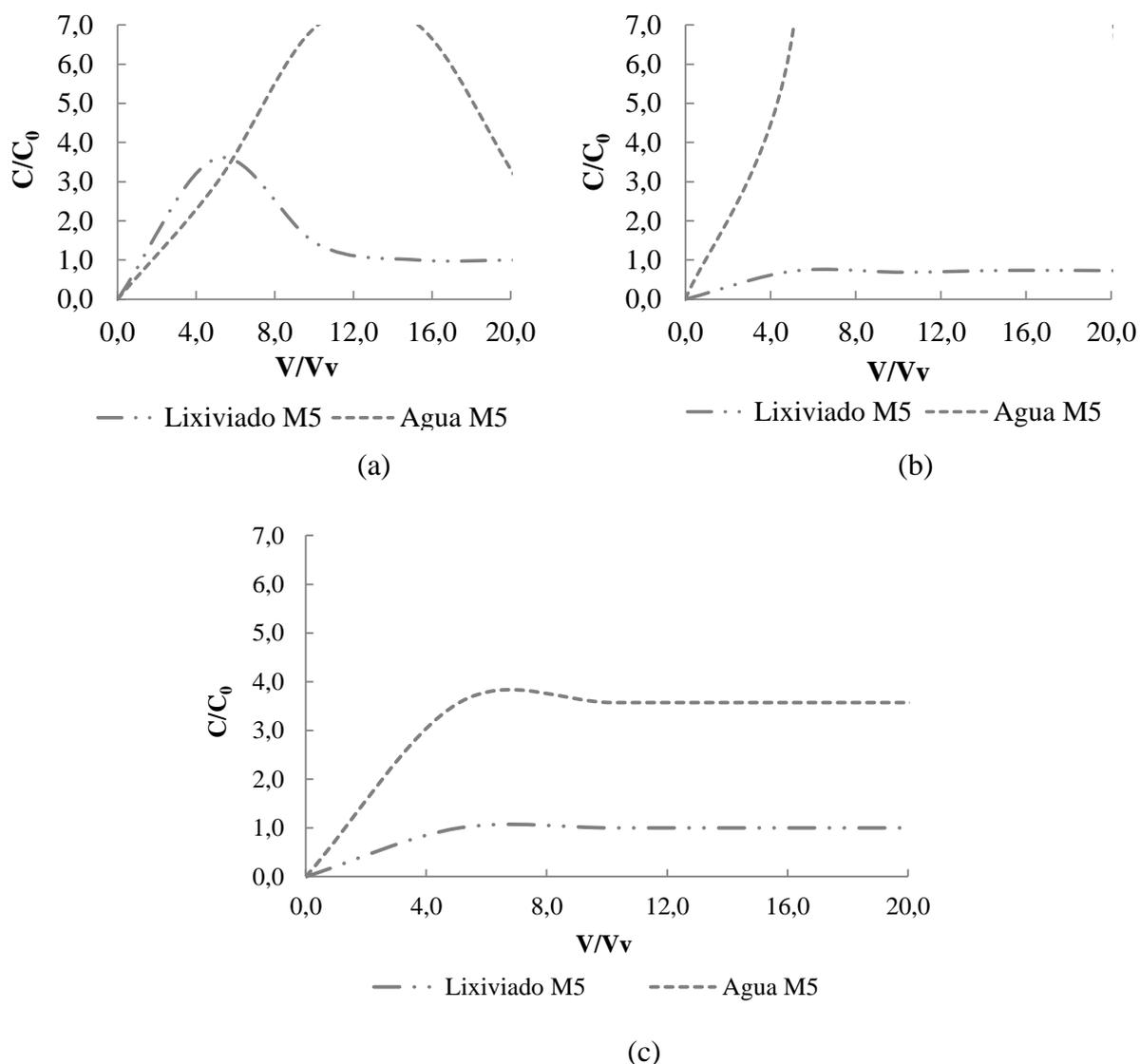


Figura 4.25 – Curvas de transporte Cádmiu, Chumbo, Cromo em lixiviado e em água da amostra M5.

Na amostra M5, as concentrações iniciais com o afluente lixiviado são maiores já que, à medida que é percolada a amostra, estas vão diminuindo até permanecer estáveis. Com a água as concentrações vão aumentando. Estes processos que acontecem no Cádmiu são inversos no volume de poros em 2,752. Agora o Cromo tanto para a água quanto para o lixiviado apresenta concentrações contínuas a partir do volume de poros um.

São apresentadas na Figura 4.26, curvas típicas características de transporte expressas em termos de concentração relativa  $C/C_0$  vs número do volume de poros (Sousa, 2004), onde podem-se observar os fenômenos mais frequentes no fluxo de contaminantes.

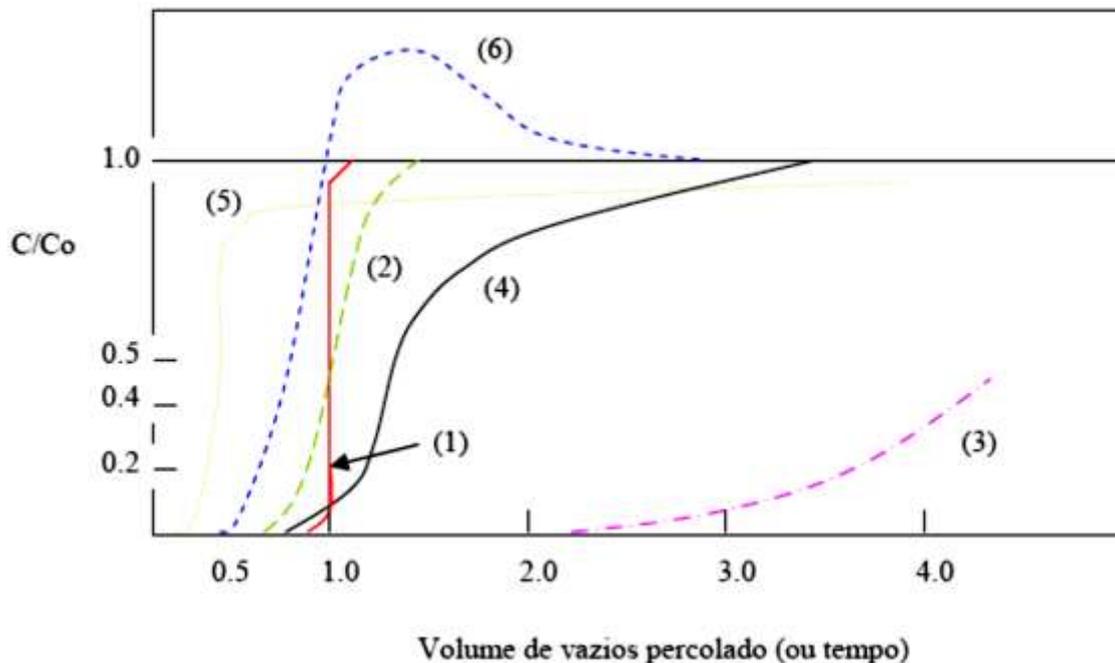


Figura 4.26 – Curvas típicas características de transporte expressas em termos de concentração relativa  $C/C_0$  x número do volume de poros (modificado de Sousa, 2004).

Na Figura 4.26, os fenômenos representados são: (1) transporte advectivo, (2) leva em conta a dispersão, (3) representa espécies químicas, (4) fluxo através de canais, atingindo o equilíbrio através da difusão, (5), fluxo através dos canais principais ou macroporos, com o equilíbrio sendo atingido mais lentamente através da difusão nos microporos, (6) dessorção.

#### 4.1.6 Comparação das amostras em água e lixiviado para cada metal a partir do ensaio em coluna.

São apresentadas as curvas das cinco amostras com afluente de água e lixiviado para os três metais. Nas Figuras 4.27 e 4.28 são ilustradas as curvas das cinco amostras (M1, M2, M3, M4 e M5) para o Cádmiu com afluente de água e de lixiviado, respectivamente.

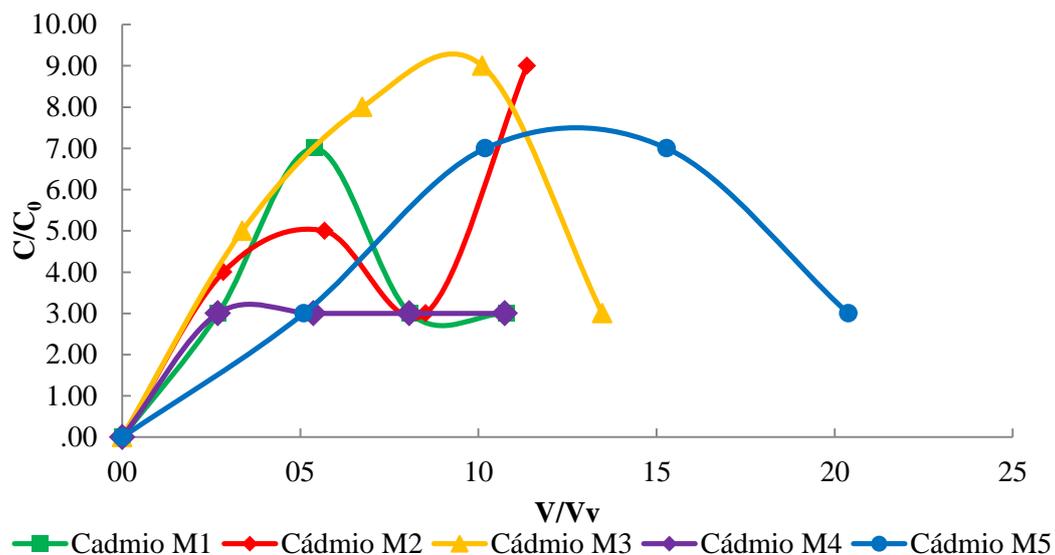


Figura 4.27 – Curvas de transporte de Cádmio com água como afluente para as cinco amostras.

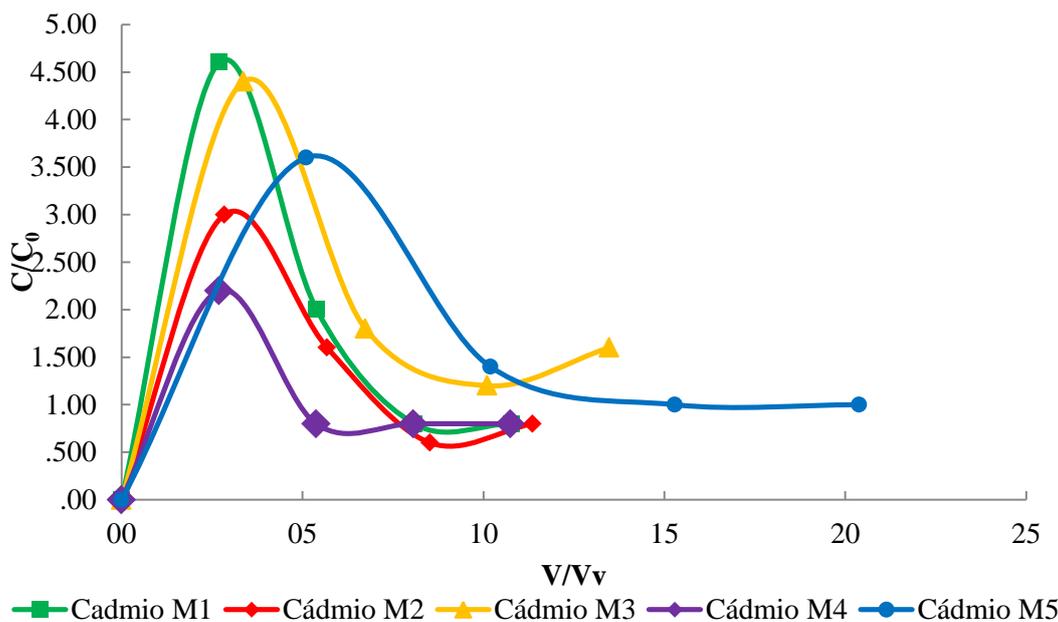


Figura 4.28 – Curvas de transporte de Cádmio com lixiviado como afluente para as cinco amostras.

O Cádmio, em todas as amostras, exceto na amostra M4 com água como afluente, sofreu o fenômeno de adsorção devido ao fluxo através dos canais principais ou macroporos, com o equilíbrio sendo atingido mais lentamente através da difusão nos microporos (Sousa, 2004). Por outro lado nas amostras com lixiviado como afluente; no volume de poros igual a 1,3 se apresenta dessorção até o volume de poros de 4,1 onde se aprecia advecção. Diferente fenômeno se

apresenta na amostra M5 com água como afluyente, onde a partir do volume de poros de 1,3, se observa a ocorrência de advecção.

Nas Figuras 4.29 e 4.30 são ilustradas as curvas das cinco amostras (M1, M2, M3, M4 e M5) para o Chumbo com afluyente de água e de lixiviado, respectivamente.

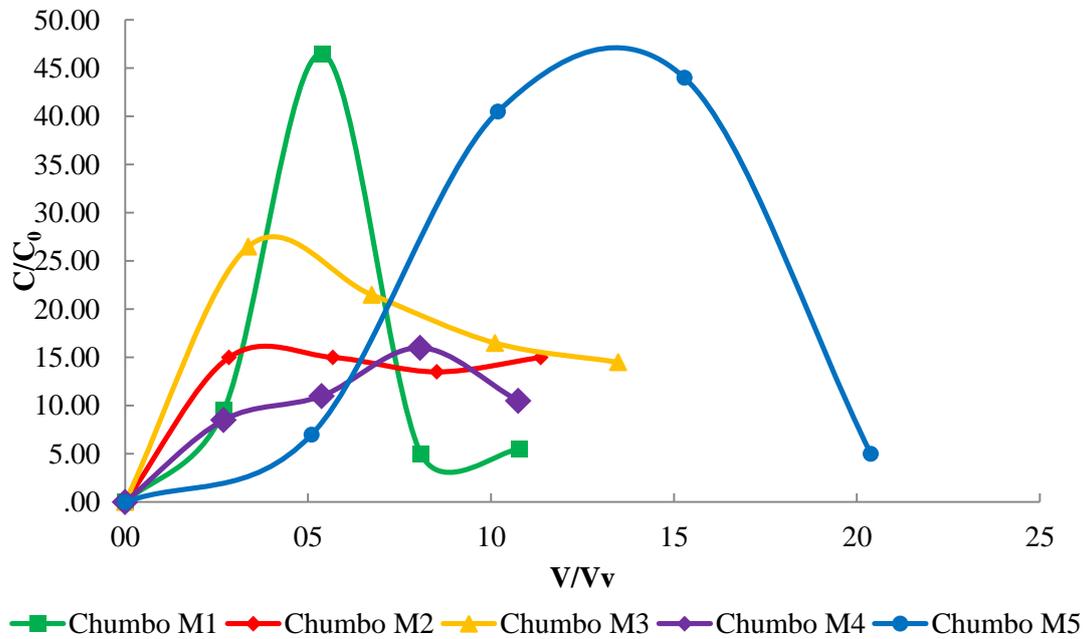


Figura 4.29 – Curvas de transporte de Chumbo com água como afluyente para as cinco amostras.

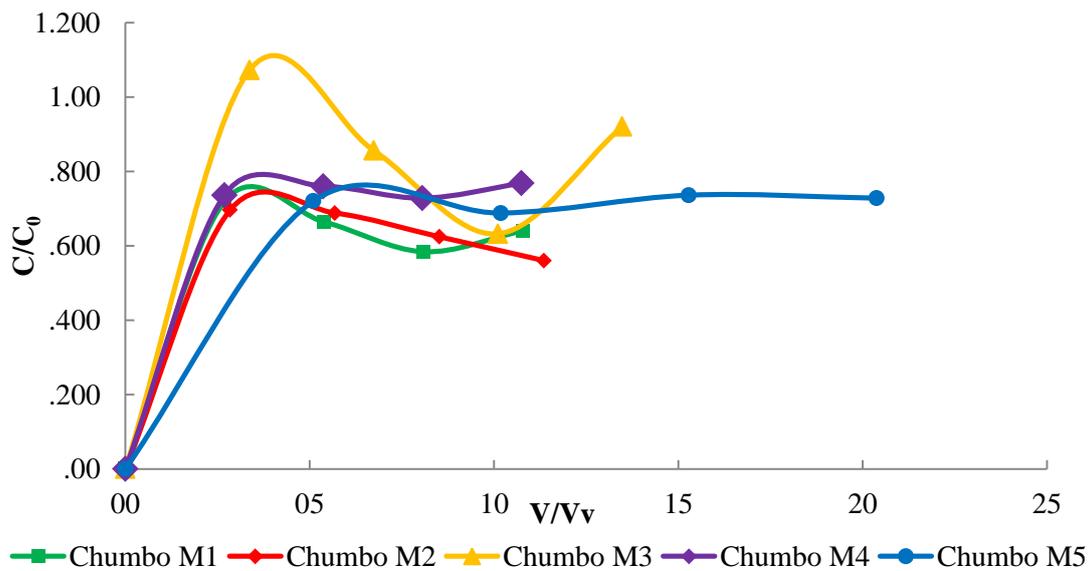


Figura 4.30 – Curvas de transporte de Chumbo com lixiviado como afluyente para as cinco amostras.

As curvas com água como solução apresentam um valor das concentrações muito maior comparado com as concentrações quando o afluente foi lixiviado. Segundo Rowe (1995) é indicativo de fluxo através de canais com espécies químicas de elevada reatividade com o solo, atingindo o equilíbrio através da difusão. Entretanto as curvas com lixiviado levam em conta a dispersão, estas tendem a espalhar a frente de contaminação da espécie química. No caso do afluente lixiviado, as curvas podem chegar antes e ser detectados no efluente antecipando-se ao volume de poros 1, nesse ponto a concentração relativa  $C/C_0$  não atinge a unidade, ou seja, o equilíbrio, é o mesmo depois do volume de poros 1.

Nas Figuras 4.31 e 4.32 são ilustradas as curvas das cinco amostras (M1, M2, M3, M4 e M5) para o Cromo com afluente de água e de lixiviado, respectivamente.

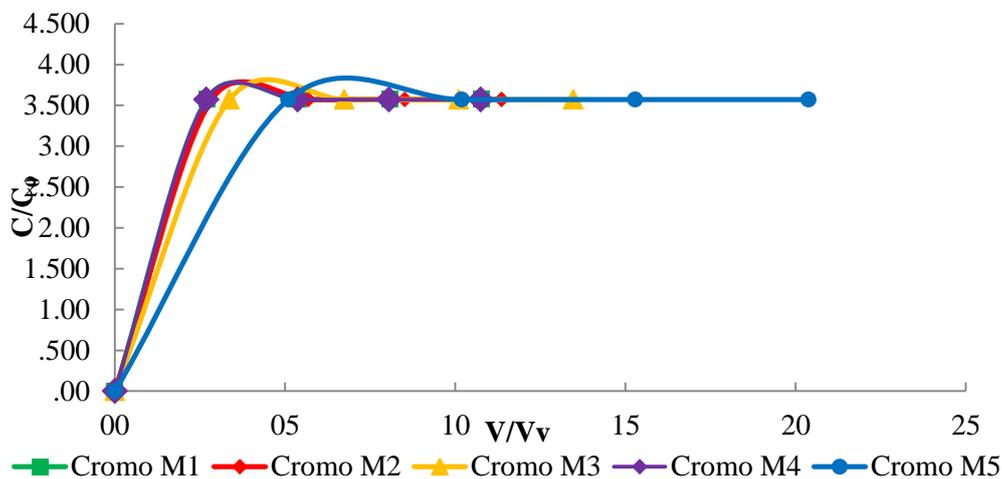


Figura 4.31 – Curvas de transporte de Cromo com água como afluente para as cinco amostras.

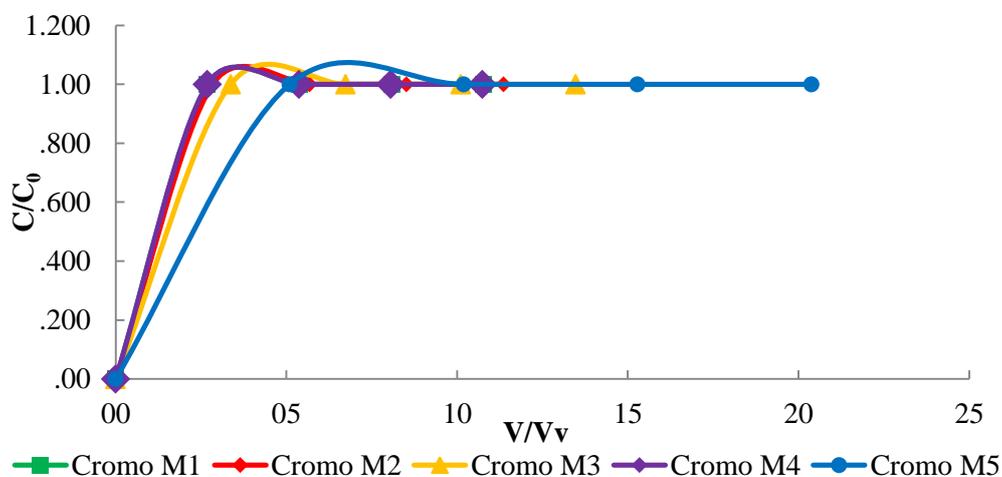


Figura 4.32 – Curvas de transporte de Cromo com lixiviado como afluente para as cinco amostras.

Para a amostra M5, o comportamento dos metais com afluentes água e lixiviado foram os mesmo, só que as concentrações com afluentes água foram 3,5 vezes maiores que o valor das concentrações com afluentes lixiviado. Percebem-se curvas de dessorção, onde são trocados metais presentes no lixiviado (Rowe, 1995).

#### 4.1.7 Ensaio de Sorção

O ensaio de sorção foi feito com o procedimento mencionado no item 3.1.14. Encontraram-se valores inconsistentes nas concentrações. Isto pode ter acontecido por erro analítico ou pela calibração dos equipamentos utilizados pelo laboratório. Optou-se por não levar em consideração os resultados do ensaio, tendo sido apresentados apenas no Anexo A.

## 4.2 TRABALHO DE CAMPO

### 4.2.1 Levantamento topográfico

Na Figura 4.33 é apresentado o mapa do levantamento topografia realizado do Morro de Moravia.



Figura 4.33 – Levantamento topográfico do Morro de Moravia, 2011.

## 4.2.2 Instrumentação

Para monitorar algumas variáveis que controlam a estabilidade do Morro, foi instalada instrumentação geotécnica composta por piezômetros e inclinômetros, nas quais as leituras frequentes apontam à localização do nível freático e o detalhamento dos possíveis deslizamentos prováveis a serem apresentados no aterro.

### 4.2.2.1 Inclínometria

A Tabela 4.48 apresenta um resumo das leituras realizadas no inclinômetro, mostrando como conclusão geral que no local da instalação, não houve deslocamentos do terreno até a profundidade de instalação durante o tempo de execução do monitoramento.

Tabela 4.36 – Resumo das leituras realizadas no inclinômetro INC-03.

Data da leitura 2012	Conclusões
<b>18 de fevereiro</b>	Deslocamentos desprezíveis, não houve movimento perceptível até a profundidade de instalação.
<b>24 de fevereiro</b>	Deslocamentos desprezíveis, não houve movimento perceptível até a profundidade de instalação.
<b>2 de março</b>	Deslocamentos desprezíveis, não houve movimento perceptível até a profundidade de instalação.
<b>8 de março</b>	Deslocamentos desprezíveis, não houve movimento perceptível até a profundidade de instalação.

### 4.2.2.2 Piezometria

Os resultados das leituras realizadas são ilustrados na Tabela 4.49 onde também é registrada a profundidade da instalação dos piezômetros, a elevação do terreno e a data da obtenção das leituras.

É observado na evolução da piezometria que não existem variações significativas no tempo em nenhum dos piezômetros. Conclui-se que o comportamento é estável, o que é consistente com as observações feitas 2008-2009.

Tabela 4.37 – Resultados das leituras realizadas nos piezômetros de Moravia 2012.

<b>Data de leitura 2012</b>	<b>Elevação</b>		
	<b>PZ-01 Profundidade:23,2m</b>	<b>PZ-02 Profundidade:25,5m</b>	<b>PZ-03 Profundidade:27,25</b>
<b>2 de fevereiro</b>	Terreno=1489	Terreno=1504	Terreno=1493
	Instalação=1465,8	Instalação=1478,5	Instalação=1465,75
	Piezométrica=1473,64	Piezométrica=1486,45	Piezométrica=1476,06
<b>18 de fevereiro</b>	Piezométrica=1473,77	Piezométrica=1485,26	Piezométrica=1476,35
<b>24 de fevereiro</b>	Piezométrica=1473,81	Piezométrica=1485,27	Piezométrica=1476,32
<b>2 de março</b>	Piezométrica=1473,89	Piezométrica=1485,8	Piezométrica=1476,38
<b>8 de março</b>	Piezométrica=1473,88	Piezométrica=1485,96	Piezométrica=1476,55

#### 4.2.3 Ensaio de campo

Cabe-se ressaltar que os níveis freáticos em Moravia, durante muitos anos, foram resultado da interação entre a decomposição dos resíduos sólidos e das águas de esgoto, produto das descargas dos moradores do lixão. Atualmente, como os moradores do Morro foram removidos, na atualidade a chuva é o único fator que contribui ao aumento do nível freático local, por esta razão foram feitos ensaios in situ, para medir as concentrações diretamente no Morro.

Nos trabalhos em campo foram realizadas perfurações que tinham como objetivos a observação e coleta de amostras de solo, a fim de identificar as principais características da cobertura pedológica. Além disso, as perfurações tinham como função gerar poços de observação dos quais foram realizadas as amostras para serem analisadas. Estas perfurações apresentavam profundidades variáveis, os poços foram construídos em diversas posições topográficas e em alguns o lençol freático não foi atingido.

##### 4.2.3.1 Montagem 1

Na Figura 4.34 são apresentadas as curvas de transporte do Cádmiu, Chumbo e Cromo nos poços P1 e P2.

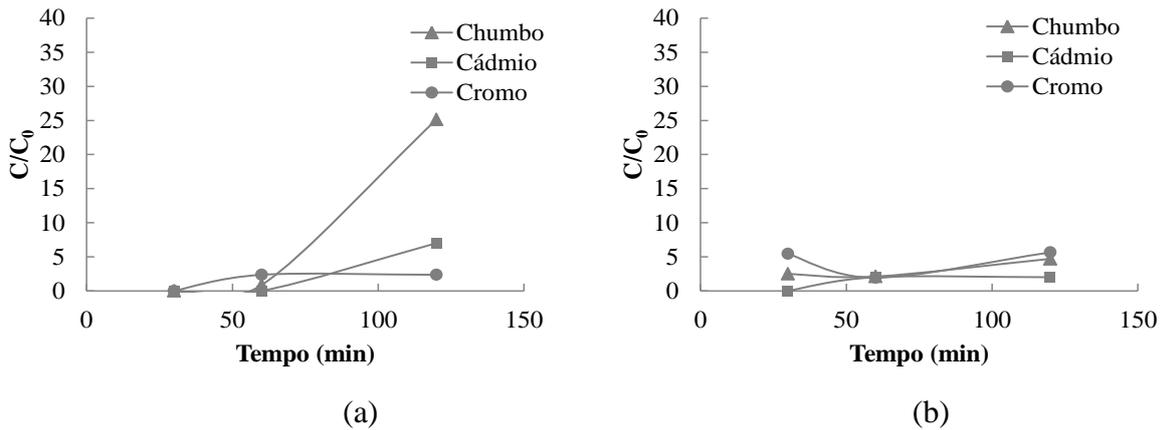


Figura 4.34 – Curvas de transporte Cádmio, Chumbo, Cromo em (a) P1 e (b) P2.

O poço P1 apresenta alto conteúdo de Chumbo e um comportamento dispersivo. A frente de contaminação tende a sofrer espalhamento, enquanto ao Cádmio apresenta retardo e o Cromo alcança o equilíbrio por meio da difusão nos microporos. O poço P2 representa as 3 espécies químicas fortemente retardadas.

Na Figura 4.35 são apresentadas as curvas de transporte do Cádmio, Chumbo e Cromo nos poços P6 e P7

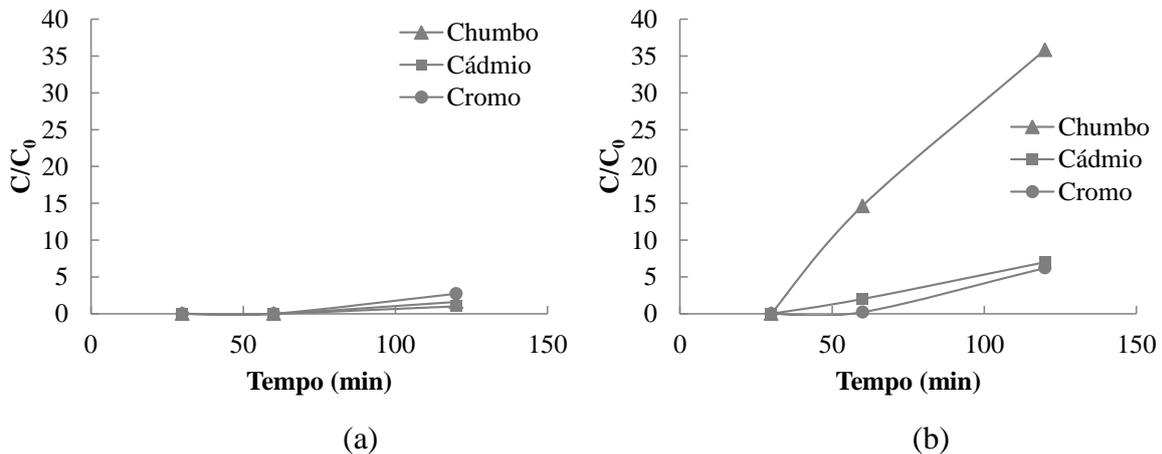


Figura 4.35 – Curvas de transporte Cádmio, Chumbo, Cromo em (a) P6 e (b) P7.

O poço P6 apresenta o fenômeno de retardo nos 3 metais e no poço P7 o Chumbo indica fluxo a través de canais, atingindo o equilíbrio por meio da difusão e o Cádmio e o Cromo apresentam sorção.

Na Figura 4.36 são apresentadas as curvas de transporte do Cádmiio, Chumbo e Cromo nos poços P8 e P9

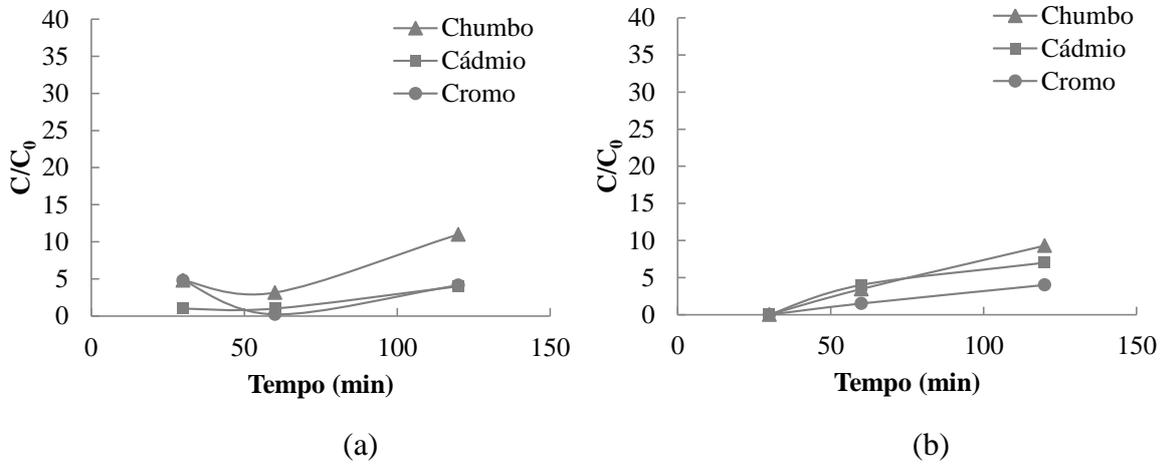


Figura 4.36 – Curvas de transporte Cádmiio, Chumbo, Cromo em (a) P8 e (b) P9.

No poço P8 os três metais apresentam retardo e podem ser lentamente sorvidas e no poço P9 apresentam difusão através do fluxo pelos macroporos.

Na Figura 4.37 são apresentadas as curvas de transporte do Cádmiio, Chumbo e Cromo nos poços P10 e P11.

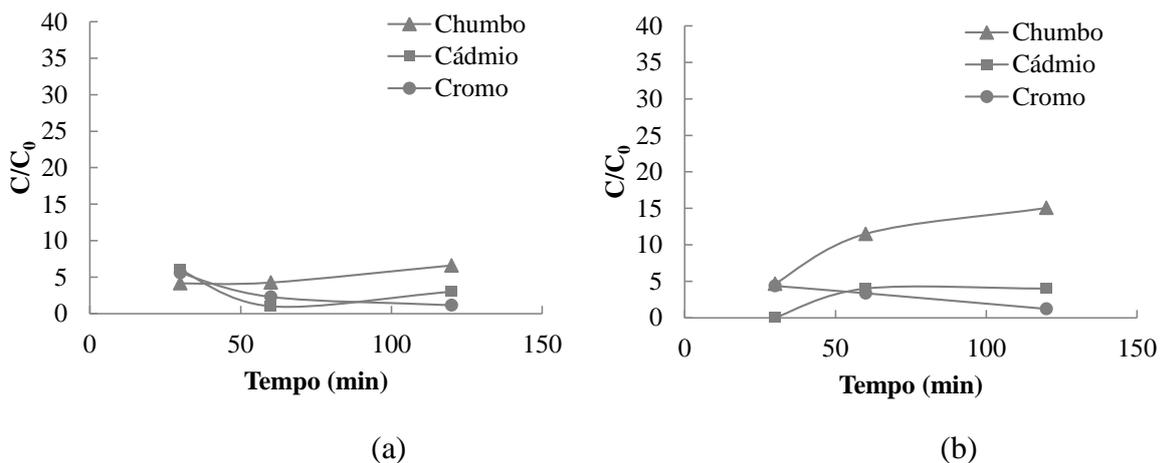


Figura 4.37 – Curvas de transporte Cádmiio, Chumbo, Cromo em (a) P10 e (b) P11.

O poço P10 representa espécies químicas fortemente retardadas, onde o equilíbrio se estabelece lentamente sendo totalmente sorvidas, em P11 se apresenta certo retardamento.

Na Figura 4.38 são apresentadas as curvas de transporte do Cádmiio, Chumbo e Cromo nos poços P12. Pode-se concluir que, no poço 12 o fenômeno que governa é a dessorção.

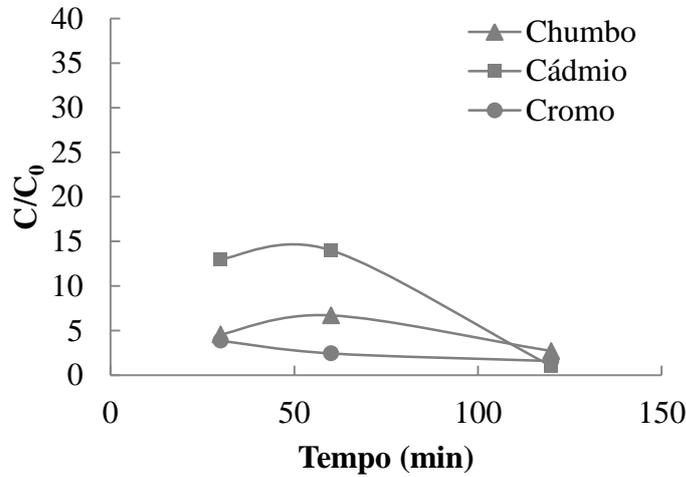


Figura 4.38 – Curvas de transporte Cádmiio, Chumbo, Cromo em P12.

#### 4.2.3.2 Montagem 2

Na Figura 4.39 são apresentadas as curvas de transporte do Cádmiio, Chumbo e Cromo nos poços P1 e P2.

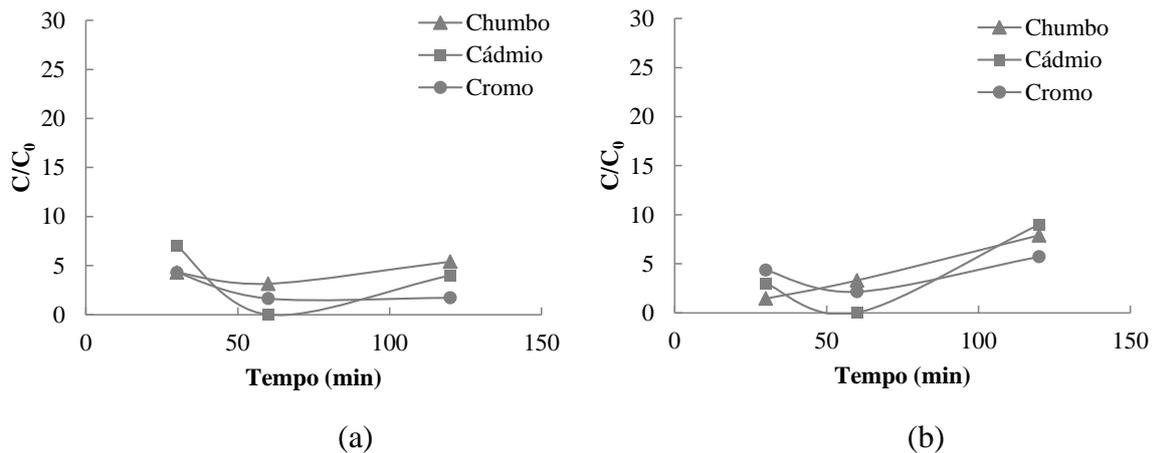


Figura 4.39 – Curvas de transporte Cádmiio, Chumbo, Cromo em (a) P1 e (b) P2.

Os poços P1 e P2 representam espécies químicas fortemente retardadas, onde o equilíbrio se estabelece lentamente sendo totalmente sorvidas.

Na Figura 4.40 são apresentadas as curvas de transporte do Cádmiio, Chumbo e Cromo nos poços P3 e P4.

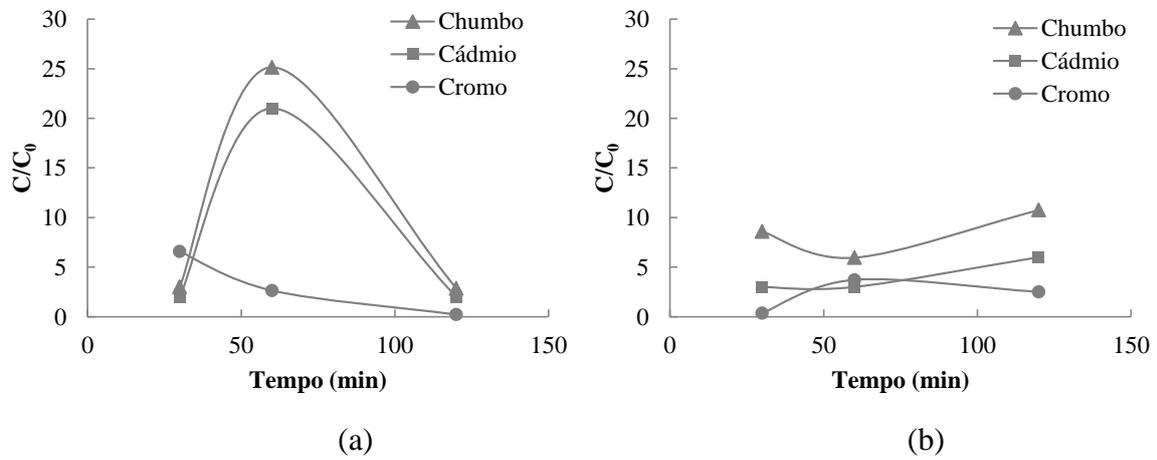


Figura 4.40 – Curvas de transporte Cádmiio, Chumbo, Cromo em (a) P3 e (b) P4.

No poço P3 é apresentada uma típica representação da dessorção para o Chumbo e o Cádmiio, onde se percebe a troca de metais no lixiviado e em P4 os metais apresentam retardo, ou seja, que estão sendo sorvidos.

Na Figura 4.41 são apresentadas as curvas de transporte do Cádmiio, Chumbo e Cromo nos poços P7 e P8.

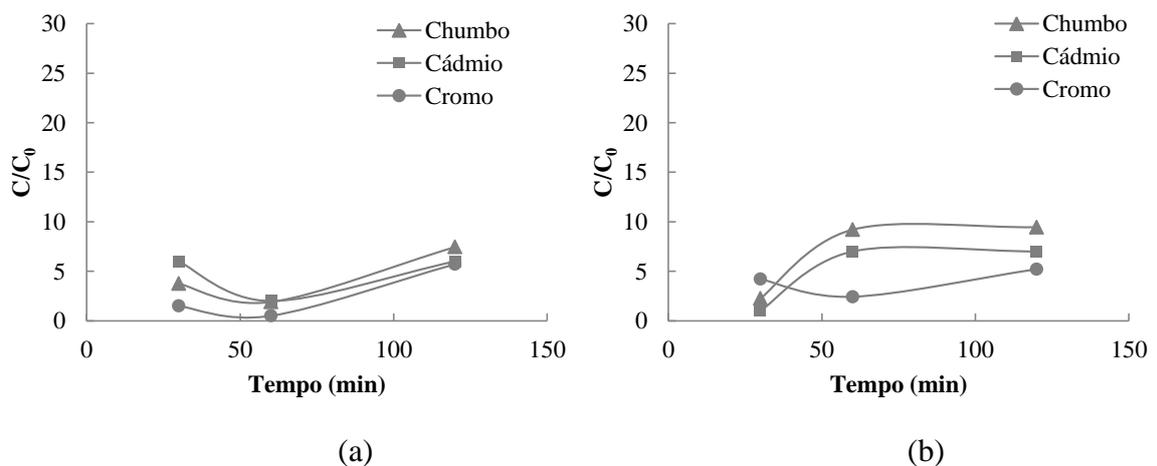


Figura 4.41 – Curvas de transporte Cádmiio, Chumbo, Cromo em (a) P7 e (b) P8.

No poço P7 se mostra o fenômeno de sorção onde os três metais aparecem com retardo. E no poço P8 se apresenta difusão com concentrações elevadas.

Na Figura 4.42 são apresentadas as curvas de transporte do Cádmio, Chumbo e Cromo nos poços P9 e P10.

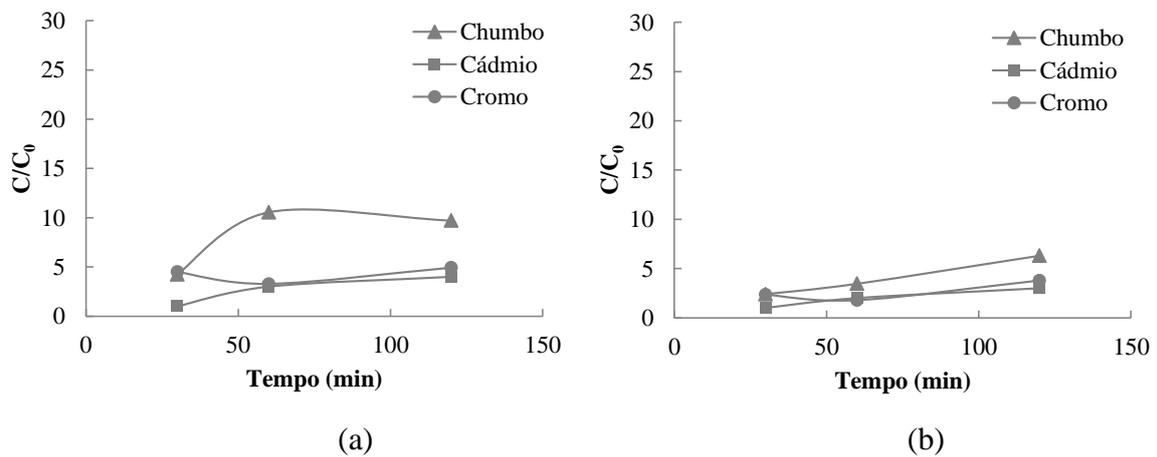


Figura 4.42 – Curvas de transporte Cádmio, Chumbo, Cromo em (a) P9 e (b) P10.

Na Figura 4.43 são apresentadas as curvas de transporte do Cádmio, Chumbo e Cromo nos poços P11.

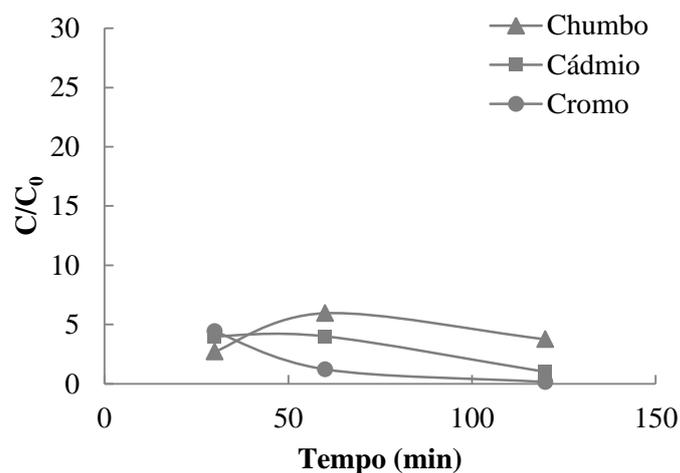


Figura 4.43 – Curvas de transporte Cádmio, Chumbo, Cromo em P11.

Segundo Campos Velarde et al (1997), os fenômenos de adsorção e dessorção são a base para medir, desenhar e operar outros processos de interesse ambiental, tais como a remoção de

compostos tóxicos e matéria orgânica recalcitrante de efluentes líquidos e gasosos e motores com recheio de carvão ativado. É fato conhecido que a descontaminação de solos e sedimentos depende principalmente do processo de dessorção.

Segundo Sanchez (2010), em sua pesquisa em fitorremediação e absorção de metais pesados em Moravia, que consistiu em coletar amostras de plantas em quatro parcelas no Morro, em três diferentes tempos após o estabelecimento das plantas, ao comparar os resultados de metais pesados das amostras, contra os limites máximos permitidos pela normativa colombiana para compostagem (ICONTEC, 2004), encontrou que o conteúdo de Pb foi 27 vezes maior. Deve-se considerar que este normativo não é tão rigoroso como normativa semelhante (Diretrizes ASCP, 2001), no âmbito deste normativo. Os resultados obtidos nesta pesquisa mais inquietantes não apenas para Pb, mas também para Cr e Cd. As maiores concentrações de Cr, Pb e Cd com valores em (mg/kg) altos, poderiam obedecer a maior exposição à lixiviados, já que as amostras coletadas neste lugar foram tomadas de uma região localizada em uma ladeira muito íngreme, recebendo assim, uma grande quantidade de água infiltrada através do solo superior. A grande variação no teor de metais pesados poderia ser explicada em termos de elevada heterogeneidade das águas de Moravia, em si um reflexo da natureza diversa e disposição aleatória de resíduos sólidos urbanos.

#### 4.2.3.3 Análise química das amostras coletadas

O Chumbo apresenta um comprimento de onda igual a 283.3 nm utilizando chama de Ar-Acetileno e tem um limite de detecção de 0,03. O equipamento foi otimizado com o padrão de nove ppm e foi recomendado fazer uma curva para 20 ppm, com esta curva são verificadas algumas amostras, onde podem ser detectadas concentrações de Pb que eram muito baixas, além disso foi necessário fazer outra curva para ler Pb para todas as amostras utilizando dois ppm que é o padrão de concentração mais elevada. A curva de calibração apresentou uma linearidade boa, com um coeficiente de correlação de 0,9997. Conforme é mostrado na Tabela 4.50 e na Figura 4.44.

Tabela 4.38 – Dados de calibração do Pb.

Padrão ID Calib em branco	Média do Sinal (absorção)	Entrada da concentração	Cálculo da concentração	Desvio padrão
	0,000	0,00	0,00	0,00
st1	0,006	0,25	0,25	0,00
st3	0,011	0,50	0,50	0,00
st4	0,021	1,00	1,00	0,00
st5	0,041	2,00	2,00	0,00

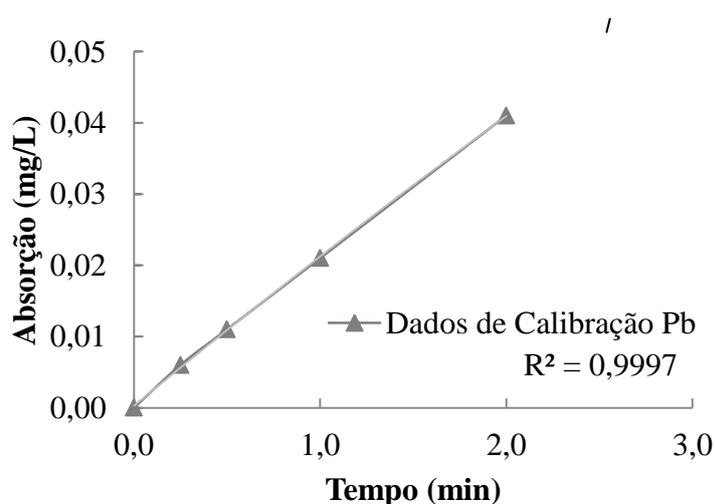


Figura 4.44 – Calibração para Pb utilizando como maior padrão 2 ppm.

O Cádmiu apresenta um comprimento de onda igual a 228,8 nm utilizando chama de Ar-Acetileno e tem um limite de detecção de 0,001. O equipamento foi otimizado com o padrão de 1,5 ppm e é recomendado fazer uma curva para dois ppm. A curva de calibração mostrou boa linearidade, com um coeficiente de correlação de 0,9995. Os dados e a curva de calibração são mostrados na Tabela 4.51 e na Figura 4.45 respectivamente.

Tabela 4.39 – Dados de calibração do Cd.

Padrão ID Calib em branco	Média do Sinal (absorção)	Entrada da concentração	Cálculo da concentração	Desvio padrão
	0,000	0,00	0,00	0,00
st1	0,015	0,10	0,11	0,00
st3	0,04	0,25	0,25	0,00
st4	0,085	0,50	0,50	0,00
st5	0,169	1,00	1,00	0,00

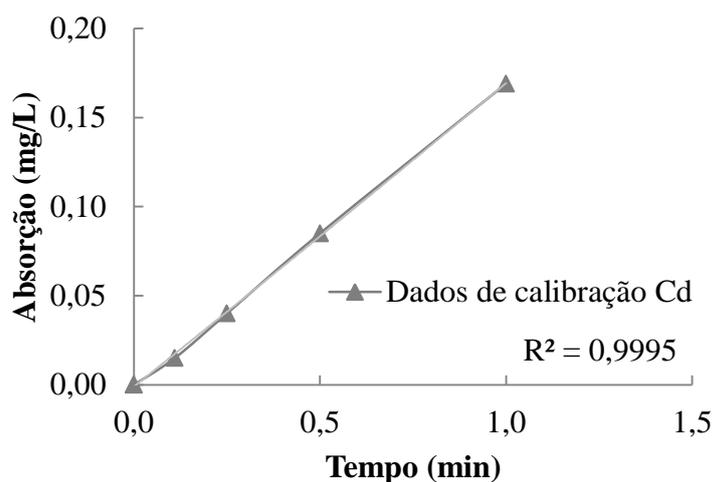


Figura 4.45 – Calibração para Cd utilizando como maior padrão 2 ppm.

O Cromo apresenta um comprimento de onda igual a 357,9 nm utilizando chama de Ar-Acetileno e tem um limite de detecção de 0,03. O equipamento foi otimizado com o padrão e Quatro ppm e é recomendado fazer uma curva para cinco ppm. Com a curva são verificado algumas amostras onde foram detectadas concentrações de Cr que eram muito baixas, por esta razão foi necessário fazer uma curva para ler Cr para todas as amostras utilizando dois ppm como o padrão de concentração mais elevada. A curva de calibração mostrou boa linearidade, com um coeficiente de correlação de 0,9997, como se apresenta na Tabela 4.52 e conforme é mostrado na Figura 4.46.

Tabela 4.40 – Dados de calibração do Cd.

Padrão ID Calib em branco	Média do Sinal (absorção)	Entrada da concentração	Cálculo da concentração	Desvio padrão
	0,000	0,00	0,00	0,00
st1	0,004	0,50	0,50	0,00
st3	0,0075	1,00	1,00	0,00
st4	0,015	2,00	2,00	0,00

A curva de calibração foi feita por cada 15 amostras analisadas para verificar o funcionamento do equipamento. O “branco” utilizado para cada análise foi água destilada. Os valores obtidos apresentam uma imprecisão de caráter analítico, isto acontece pelas baixas concentrações de metais nas amostras de lixiviado do aterro de Moravia (Antioquia-Colômbia). Este evento é comum em aterros que têm mais de dez anos de não utilização pela lavagem de metais ao longo do tempo.

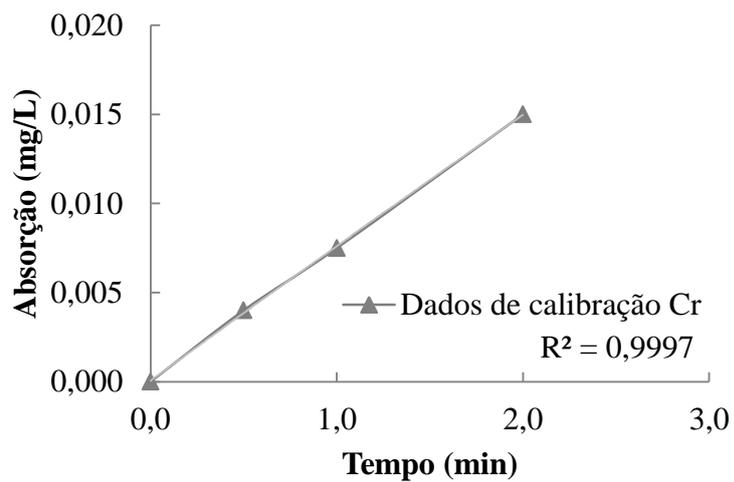


Figura 4.46 – Calibração para Cr utilizando como maior padrão 2ppm

### 5 CONCLUSÕES

Determinou-se o padrão de fluxo de três metais pesados (Cromo, Cádmio e Chumbo), presentes no lixiviado gerado no lixão de Moravia, eles percolam em direção ao rio Medellín (Colômbia).

As cinco amostras analisadas foram classificadas pela SUCS em solo orgânico, sendo OH e OL, silte orgânicos e MH ou CH argilas orgânicas. Esta característica no solo é devido a decomposição por microorganismos das plantas e animais, neste caso, próprias de um lixão.

Ressalta-se que foram encontradas concentrações surpreendentemente altas nos ensaios de laboratório, quando o fluido percolado foi água, comparado com as concentrações quando o afluente foi lixiviado. Para verificar esta informação foram construídos dois campos experimentais no Morro, e o fluido percolado foi de novo água da torneira.

Do ensaio em coluna, foram obtidas altas concentrações de metais quando o efluente era água, ou seja, a água assumiu o papel de agente desorssivo dos contaminantes contidos no solo. Por outro lado, do ensaio realizado in situ percebeu-se a mesma situação, as concentrações de metais coletadas nos poços de inspeção também foram altas quando o agente percolante era a água. Esta comparação nos ajuda a concluir que o fenômeno que liderou os ensaios em laboratório e em campo é a dessorção. Em campo se constatou que o valor das concentrações, quando a água foi percolada era alto, alcançando concentrações até 46 vezes maiores quando comparado com o efluente do lixiviado.

No ensaio de sorção, os resultados fornecidos pelo laboratório foram inconsistentes. Observaram-se valores iniciais da concentração negativos. Isso é um problema analítico do laboratório. É provável que as curvas de calibração para os metais não alcançaram os pontos amostrados. Além disso, pode ter ocorrido má calibração do equipamento, ou um possível erro de execução, devido a falta do equipamento adequado para realizar a centrifugação das amostras deste ensaio.

Os resultados da instrumentação geotécnica instalada descreveram um cenário de estabilidade e regularidade dos níveis freáticos.

Finalmente, pode-se concluir que Moravia é uma fonte de contaminação ativa, e o rio (maior afluente da cidade), esta sendo altamente afetado pelo fluxo de contaminante gerado pelo lixão, tornando a situação ainda pior na época das chuvas.

## **5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

O caso de Moravia é um problema grave porque além de gerar grandes quantidades de contaminantes tanto gases como líquidos, esta contaminando o rio Medellín. O rio é o único e mais importante da região porque em torno dele a cidade desenvolve-se. Além disso, até hoje existem pessoas que subsiste vivem de trabalhar no rio, ignorando o risco ao qual estão expostos.

Para futuras pesquisas sugerem-se continuar com a investigação fazendo ensaios conjuntos em laboratório e campo, tendo como base o presente estudo.

As novas pesquisas podem servir para complementar este estudo porque até o momento trata-se do único relatório realizado sobre o fluxo de metais pesados no rio Medellín.

Recomenda-se realizar novas medidas de ensaios em coluna, sorção, vinculadas à medidas de temperatura, pH, CTC, MO, extração sequencial para conhecer como o metal pesado está ligado ao solo.

Recomenda-se o desenvolvimento de um modelo adequado para representar o fenômeno do transporte multiéspecie e o fenômeno da dessorção.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7183 (1982) - Determinação do limite e relação de contração de solo. 3 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6459 (1984) – Determinação do limite de liquidez. 6 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7180 (1984) - Solo - Determinação do limite de plasticidade. 3 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7181 (1984) - Solos - Análise granulométrica. 13 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6508 (1984) - Grãos de solo que passam na peneira N° 4,8mm determinação da massa específica. 8 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 10838 (1988) - Solo- Determinação de massa específica aparente de amostra indeformada c/emprego da balança hidrostática. 4 p
- Bear, J., (1972) . Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier Publishing Company, New York, EUA.
- Bear, J. (1979). Hydraulics of Groundwater. McGraw-Hill, New York, N.Y., 26-269 p.
- Bear, J. and Bachmat, Y (1990). Introduction to Modeling Phenomena of Transport in Porous Media. Kluwer, Dordrecht, 553 p.
- Bear, J. & Cheng., A. (2010). Modeling Ground Water Flow and Contaminant Transport. Ed, Springer, New York, NY. USA.
- Berkowitz, B., Dror, I. & Yaron, B. (2008). Contaminant Geochemistry, Interactions and Transport in the Subsurface Environment. Ed, Springer, Berlin, Heidelberg, (61-65) 220-223 p.

- Boscov, M. E. G., (1997). Contribuição ao Projeto de Sistemas de Contenção de Resíduos Perigosos Utilizando Solos Lateríticos. São Paulo: Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado – Escola Politécnica. 259p
- Boscov, M. E. G., (2008). Geotecnia Ambiental. Oficina de textos, São Paulo, SP, 248 p.
- Braga, B., Hespanhol, I, Conejo, J. G. L., Mierzwa, J. C., Barros, M. T. L., Spencer, M., Porto, M., Nucci, N., Juliano, N., Eiger, S., (2005). Introdução à Engenharia Ambiental. São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2 ed. 336 p.
- Campos-Velarde D, Poggi-Varaldo HM, Ríos-Leal E, López-Mercado V, Fernández-Villagómez G (1997) Chlorophenol and phenol contaminated water treatment in biological fluidized beds. En Leeson A, Alleman BC (Eds.) In situ and On site Bioremediation Vol. 3. Battelle Press. Columbus, OH. pp. 273-278.
- Cano C., Otálvaro I. & Salazar i. C. (2001). Clasificación y caracterización de suelos tropicales originados del stock gabróico de san diego. Tdg, universidad nacional de colombia, sede medellín. 134 p
- Cavalcante, A. L. B., (2010) Notas de aula da Disciplina de Transporte de Contaminantes e Sedimentos, ministrada em 2010. Programa de Pós Graduação em Geotecnia, UnB.
- Conciani, R. (2011). Estudos de Barreiras de Solo Compactado para Retenção de Contaminantes. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, DF, Brasília.
- Demuelenaere, R. G. A., (2004). Caracterização de Propriedades de Transporte de metais Pesados em Solos Residuais do Rio de Janeiro. 0210667/CA, Tese de mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ. 120 p.
- Domenico, P.A. & Schwartz, F.W. (1998). Physical and Chemical Hydrogeology. Ed, 2nd, John Wiley and Sons. Inc, New York, NY, USA, 506, p.
- EPA, Environmental Protection Agency, (1992). Technical Resource Document: Batch-type Procedures for Estimating Soil Adsorption of Chemicals, EPA/530-SW-87-006-F. Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, 100 p.
- Evangelou, V.P.(1998). Environmental Soil and Water Chemistry: principles and applications. New York:221-223 p.

- Fetter, C.W. (1993). Contaminant Hydrogeology. Mc Millan Publishing Company. New York. 458 p.
- Fetter, C.W. (2008). Contaminant Hydrogeology. Ed. 2nd, Waveland Press, Inc. London, U.K. 234 p.
- Freeze, R. A.; Cherry, J. A., (1979). Groundwater. Prentice Hall, Inc. U.S. 604p.
- GDCON (2012) “Monitoreo de Lixiviados y Gases en el Sector de Moravia” Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación. Universidad de Antioquia. Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Medellín-Colômbia.
- Geodataandina. (1993). [http://www.geodataandina.cl/pdf\\_es/spiezome.pdf](http://www.geodataandina.cl/pdf_es/spiezome.pdf)
- Hoog, D. S.; McLaren, R. G.; Swift, R. S (1993). Desorption of copper from some New Zealand soils. Soil Science Society of American Journal, Madison, v. 57, p. 361-366.
- Instituto Colombiano De Normas Técnicas ICONTEC (2004). Norma técnica colombiana 5167. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados Acta biol. Colomb., Vol. 15 N.º 2, 2010 285 como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo. Bogotá: ICONTEC.
- Instituto de Estudios de Infraestructura. (2009) “Evaluación Geotécnica del barrio Moravia en la ciudad de Medellín” Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Area Metropolitana del Valle de Aburrá.
- Lagrega, M.D.; Buckingham, P.L. & Evans, J.C. (1994). Hazardous Waste Management. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering. McGraw Hill, Book Co., Inc., New York, N.Y, 623 pp
- Miller Junior, G. T. , (2008) Ciência Ambiental. Ed. Pioneira Thomson. 568 p. 11 ed. ISBN 8522105499, EAN 9788522105496
- Nascentes, R., (2006). Estudo da mobilidade de metais pesados em um solo residual compactado. Viçosa, MG, Brazil: Universidade Federal de Viçosa. Tese de doutorado 155p. 2006.
- Ordoñez, C. A. (2007). “Calibración de Modelos Geotécnicos para Simular el Comportamiento de los Rellenos Sanitarios Curva de Rodas y la Pradera Mediante Registros de Instrumentación”.

- Tesis para optar el título de Magíster en Ingeniería – Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.
- Ozelim, L.C.S.M. & Cavalcante, A.L.B. (2012). “Some Integral and Closed Form Analytical Solutions to the Transport Contaminant Equation considering 3-D Advection & Dispersion”. *International Journal of Geomechanics*. ISSN 1532-3641, p. 1-9.
- Ritter, E.; Ehrlich, M. & Barbosa, M.C. (1999). Difusão e Sorção de Soluções Múltiplas e Monosoluções em Solos Argilosos Salinos e Não-salinos. 4º Congresso Brasileiro de Geologia Ambiental, REGEO’99, São José dos Campos, SP, p 331-338.
- Rowe, R. K. Quigley, R. M. e Booker J. R., (1995). *Clayey Barrier Systems For Waste Disposal Facilities*. E&FN Spon, London, UK, 390 p.
- Sánchez, MS, Carvajal H, Barahona R, Salazar C (2010). Producción de biomasa y absorción de metales pesados para cuatro plantas crecidas en el basurero Moravia, Medellín.
- Sousa, T. C., (2004). Estudo da atenuação natural dos solos tropicais: uma contribuição para a normatização dos ensaios com fluxo de contaminantes. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, DF, 173 p.
- Sperling, M. V., (2005). Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol 1. Ed. UFMG, Belo Horizonte, MG. 452 p.
- UPS (2012), Universidad Politécnica salesiana. “Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales”.  
<[http://www.bvsde.paho.org/cursoa\\_rsm/e/unidades/unidad1.pdf](http://www.bvsde.paho.org/cursoa_rsm/e/unidades/unidad1.pdf)>
- Van der Perk, M. (2007). *Soil and Water Contamination: From Molecular To Catchment Scale*. Ed, Taylor & Francis, London, UK, 171-214 p.
- Vargas. E A. (2001) – Notas de Aula de Hidrologia das Águas Subterrâneas. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Wexler, E.J. (1992). *USGS Chapter B7: Analytical Solutions for One-, Two-, and Three-Dimensional Solute Transport in Ground-Water Systems with Uniform Flow*. Reston, Virginia: USGS.

- Woldt, W. (1990). Ground Water Contamination Control: Detection and Remedial Planning. Teses (Doutorado), Universidade de Nebraska, Lincoln, Nebraska, USA.
- Yin, Y.; Impellitteri, C. A.; You, S.J.; Allen, H.E.(2002). The importance of organic matter distribution and extract soil:solution ratio on the desorption of heavy metals from soils. The Science of the Total Environment, Amsterdam, v. 287, p. 107-119.
- Zheng, C. & Wang, P.P. (1999). MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide. U.S. Army Corps of Engineers.
- Zhu, B.; Alba, A.K. (1993). Differential adsorption of trace metal by soils as influenced by exchangeable cations and ionic strength. Soil Science, New Brunswick, v. 155, n. 1, p. 61-66.

## A 1 Ensaio de Sorção

Segundo ZHU & ALVA (1993), pode-se afirmar que fazendo uma comparação com os estudos de adsorção pouco tem sido feito quanto à dessorção de metais, havendo dificuldades metodológicas para sua execução. Embora os estudos de adsorção de metais em solos sob condições tropicais sejam relativamente abundantes, poucos têm examinado o processo da dessorção (HOOG et al., 1993).

O ensaio de sorção foi feito com o procedimento mencionado no Item 3.1.14. Na Tabela A.1 até a Tabela A.12 são apresentados os resultados dos ensaios de sorção.

Pode-se observar nas Tabelas A.1 a A.4 que, para as concentrações iniciais do Cádmio nas três primeiras proporções de solo:solução foram obtidos valores negativos. É provável que tenha sido erro de calibração, portanto, não podem ser levados em conta para o ensaio. Além disso, a medida que a diluição ocorria, a concentração aumentava.

Tabela A.1 – Concentrações de Cádmio na amostra M1

Solução	C <sub>o</sub> (mg/L)	C <sub>e</sub> (mg/L)	Módulo M. sorvida (g)	S (mg/g)
1:1	-0,005	0,035	0,0200	0,00040
1:2	-0,003	0,034	0,0185	0,00037
1:4	-0,003	0,033	0,0180	0,00036
1:8	0,002	0,030	0,0140	0,00028
1:16	0,014	0,035	0,0105	0,00021

Tabela 2 – Concentrações de Cádmio na amostra M2

Solução	C <sub>o</sub> (mg/L)	C <sub>e</sub> (mg/L)	Módulo M. sorvida (g)	S (mg/g)
1:1	-0,005	0,380	0,1925	0,0039
1:2	-0,003	0,326	0,1645	0,0033
1:4	-0,003	0,354	0,1785	0,0036
1:8	0,002	0,374	0,1860	0,0037
1:16	0,014	0,434	0,2100	0,0042

Tabela 3 – Concentrações de Cádmio na amostra M3

<b>Solução</b>	<b>C<sub>o</sub> (mg/L)</b>	<b>C<sub>e</sub> (mg/L)</b>	<b>Módulo M. sorvida (g)</b>	<b>S (mg/g)</b>
1:1	-0,005	0,115	0,060	0,00120
1:2	-0,003	0,123	0,063	0,00126
1:4	-0,003	0,145	0,074	0,00148
1:8	0,002	0,151	0,075	0,00149
1:16	0,014	0,120	0,053	0,00106

Tabela 4 – Concentrações de Cádmio na amostra M4

<b>Solução</b>	<b>C<sub>o</sub> (mg/L)</b>	<b>C<sub>e</sub> (mg/L)</b>	<b>Módulo M. sorvida (g)</b>	<b>S (mg/g)</b>
1:1	-0,005	0,033	0,019	0,0004
1:2	-0,003	0,029	0,016	0,0003
1:4	-0,003	0,022	0,013	0,0003
1:8	0,002	0,027	0,013	0,0003
1:16	0,014	0,026	0,006	0,0001

Para o Chumbo, Tabela A.5 até Tabela A.8 foram obtidos valores da concentração do efluente maiores que as concentrações iniciais, encontrando-se valores negativos no cálculo da massa sorvida. Por esta razão, se expressa em módulo de massa sorvida. Pode-se observar que em geral ocorreu o fenômeno de dessorção. Para este mecanismo os modelos clássicos como Langmuir e Freundlich não podem ser aplicados.

Tabela 5 – Concentrações de Chumbo na amostra M1

<b>Solução M1</b>	<b>C<sub>o</sub> (mg/L)</b>	<b>C<sub>e</sub> (mg/L)</b>	<b>Módulo M. sorvida (g)</b>	<b>S (mg/g)</b>
1:1	0,020	2,262	1,121	0,0224
1:2	0,039	2,186	1,074	0,0215
1:4	0,030	2,024	0,997	0,0199
1:8	0,047	2,026	0,990	0,0198
1:16	0,029	1,918	0,945	0,0189

Tabela 6 – Concentrações de Chumbo na amostra M2

<b>Solução M2</b>	<b>C<sub>o</sub> (mg/L)</b>	<b>C<sub>e</sub> (mg/L)</b>	<b>Módulo M. sorvida (g)</b>	<b>S (mg/g)</b>
1:1	0,020	55,650	27,815	0,5563
1:2	0,039	42,060	21,011	0,4202
1:4	0,030	37,580	18,775	0,3755
1:8	0,047	36,060	18,007	0,3601
1:16	0,029	32,985	16,478	0,3296

Tabela 7 – Concentrações de Chumbo na amostra M3

<b>Solução M3</b>	<b>C<sub>o</sub> (mg/L)</b>	<b>C<sub>e</sub> (mg/L)</b>	<b>Módulo M. sorvida (g)</b>	<b>S (mg/g)</b>
1:1	0,020	10,252	5,116	0,1023
1:2	0,039	11,110	5,536	0,1107
1:4	0,030	15,213	7,592	0,1518
1:8	0,047	13,173	6,563	0,1313
1:16	0,029	10,172	5,072	0,1014

Tabela 8 – Concentrações de Chumbo na amostra M4

<b>Solução M4</b>	<b>C<sub>o</sub> (mg/L)</b>	<b>C<sub>e</sub> (mg/L)</b>	<b>Módulo M. sorvida (g)</b>	<b>S (mg/g)</b>
1:1	0,020	0,765	0,373	0,0075
1:2	0,039	0,918	0,440	0,0088
1:4	0,030	1,584	0,777	0,0155
1:8	0,047	1,431	0,692	0,0138
1:16	0,029	0,744	0,358	0,0072

Da Tabela A.9 até Tabela A.12, as concentrações do Cromo apresentam o mesmo fenômeno encontrado no Chumbo. Estes dados representam o mecanismo de dessorção por isso foi calculado o módulo da massa sorvida. Não foi possível se determinar os parâmetros de transporte com as isotermas porque o comportamento das concentrações não acompanham as curvas dos modelos.

Tabela 9 – Concentrações de Cromo na amostra M1

<b>Solução M1</b>	<b>C<sub>o</sub> (mg/L)</b>	<b>C<sub>e</sub> (mg/L)</b>	<b>Módulo M. sorvida (g)</b>	<b>S (mg/g)</b>
1:1	0,016	5,472	2,728	0,0546
1:2	0,033	4,302	2,143	0,0429
1:4	0,022	4,074	2,029	0,0406
1:8	0,017	3,660	1,822	0,0364
1:16	0,042	4,848	2,416	0,0483

Tabela 10 – Concentrações de Cromo na amostra M2

<b>Solução M2</b>	<b>C<sub>o</sub> (mg/L)</b>	<b>C<sub>e</sub> (mg/L)</b>	<b>Módulo M. sorvida (g)</b>	<b>S (mg/g)</b>
1:1	0,016	5,046	2,515	0,0503
1:2	0,033	9,606	4,787	0,0957
1:4	0,022	11,144	5,561	0,1112
1:8	0,017	12,266	6,125	0,1225
1:16	0,042	12,850	6,404	0,1281

Tabela 11 – Concentrações de Cromo na amostra M3

<b>Solução M3</b>	<b>C<sub>o</sub> (mg/L)</b>	<b>C<sub>e</sub> (mg/L)</b>	<b>Módulo M. sorvida (g)</b>	<b>S (mg/g)</b>
1:1	0,016	3,292	1,638	0,0328
1:2	0,033	4,335	2,151	0,0430
1:4	0,022	3,992	1,985	0,0397
1:8	0,017	3,491	1,737	0,0347
1:16	0,042	3,478	1,718	0,0344

Tabela 12 – Concentrações de Cromo na amostra M4

<b>Solução M4</b>	<b>C<sub>o</sub> (mg/L)</b>	<b>C<sub>e</sub> (mg/L)</b>	<b>Módulo M. sorvida (g)</b>	<b>S (mg/g)</b>
1:1	0,042	1,754	0,856	0,0171
1:2	0,033	1,850	0,909	0,0182
1:4	0,022	1,219	0,599	0,0120
1:8	0,017	1,174	0,579	0,0116
1:16	0,016	1,046	0,515	0,0103

Plotando-se os dados em um gráfico, foram encontradas retas que não representam o fenômeno de adsorção. Além disso, se encontrou um trecho da reta das concentrações que retornou à origem. Segundo Evangelou (1998), nos estudos de troca iônica, a forma do íon é idêntica na adsorção e na dessorção, entretanto, o processo de dessorção, pode ser afetado pela histerese. Os metais ligados à matéria orgânica são rapidamente adsorvidos, enquanto na dessorção ocorre de modo mais lento (YIN et al., 2001).