

ESTUDO DO TRANSPORTE DE CONTAMINANTES NA ÁREA
DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
DA CIDADE DE CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

FRANCHEL PEREIRA FANTINATTI NETO

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Estadual do Norte
Fluminense com requisito parcial para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Sérgio Tibana

Co-Orientador: Prof. Frederico Terra de Almeida

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO – 2007

ESTUDO DO TRANSPORTE DE CONTAMINANTES NA ÁREA
DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
DA CIDADE DE CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

FRANCHEL PEREIRA FANTINATTI NETO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense com requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Aprovada em 28 / 02 / 2007

BANCA EXAMINADORA:

Prof. D.Sc. Sérgio Tibana; LECIV/CCT/UENF (Orientador).

Prof. Ph.D. Roberto Francisco de Azevedo; DEC/UFV.

Prof. D.Sc. Aldo Durand Farfán; LECIV/CCT/UENF.

Prof. D.Sc. Fernando Saboya Albuquerque Júnior; LECIV/CCT/UENF.

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

26/2007

Fantinatti Neto, Franchel Pereira

Estudo do transporte de contaminantes na área de disposição de resíduos sólidos da cidade de Campos dos Goytacazes - RJ / Franchel Pereira Fantinatti Neto. – Campos dos Goytacazes, 2007.

ii, 100 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) --Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2007.

Orientador: Sérgio Tibana. Co-orientador: Frederico Terra de Almeida.

Área de concentração: Geotecnia ambiental.

Bibliografia: f. 95-100

1. Simulação numérica 2. Transporte de contaminantes 3. Dinâmica de fluxo 4. Permeabilidade *in situ* 5. Caracterização físico-química do solo 6. Monitoramento I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil II. Título

CDD 363.728098153

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Justificativa e Relevância	3
1.3 Objetivo	4
1.4 Descrição dos Capítulos	5
CAPÍTULO II – PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 GERAÇÃO DE LIXIVIADOS	6
2.2 TRANSPORTE DE CONTAMINANTES	8
2.2.1 Processos Físicos	8
2.2.2 Processos Químicos	10
2.3 GEOQUÍMICA DOS METAIS PESADOS	11
2.3.1 Destino de Metais no Solo	12
2.3.2 Comportamento de Metais Específicos	13
2.4 ESTUDOS DE REFERÊNCIA	14
2.4.1 ARAÚJO et al. (2006)	14
2.4.2 MACHADO et al. (2004)	15
2.4.3 COELHO et al. (2003)	16
2.4.4 COTA, CARVALHO FLO. & BRANCO (2002)	17
2.4.5 GERMANO (2001)	18

CAPÍTULO III – ÁREA DE ESTUDO	19
3.1 LOCALIZAÇÃO	19
3.2 ASPECTOS AMBIENTAIS	20
3.3 GEOLOGIA	23
3.4 PEDOLOGIA	25
3.5 GEOMORFOLOGIA	25
3.6 HIDROGEOLOGIA	27
3.7 PLUVIOMETRIA	27
CAPÍTULO IV – METODOLOGIA	29
4.1 ATIVIDADES DE CAMPO	29
4.1.1 Sondagem a Trado	29
4.1.2 Caracterização Tátil-Visual	29
4.1.3 Instrumentação	30
4.1.4 Levantamento Planialtimétrico	33
4.1.5 Monitoramento das Cargas Hidráulicas	34
4.1.6 Ensaio de Permeabilidade <i>in situ</i>	35
4.2 ATIVIDADES DE LABORATÓRIO	37
4.2.1 Ensaio de Caracterização Física do Solo	37
4.2.2 Ensaio de Caracterização Química do Solo	37
4.2.3 Ensaio por Difração de Raios-X	37
CAPÍTULO V – RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO	39
5.1. 1 Caracterização Tátil-Visual	39
5.1. 2 Análise Granulométrica	40

5.1.3 Levantamento Planialtimétrico	54
5.1.4 Limites de Atterberg	56
5.1.5 Atividade Skempton	56
5.1.6 Densidade Real dos Grãos	56
5.1.7 Umidade Natural	56
5.1.8 Permeabilidade <i>in situ</i>	58
5.1.9 Monitoramento das Cargas Hidráulicas	63
5.2 ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO	66
5.2.1 Caracterização Química	66
5.2.2 Identificação Química por Difração de Raios-X	67
CAPÍTULO VI – SIMULAÇÃO NUMÉRICA	69
6.1 APLICATIVO SEEP/W	69
6.1.1 Discretização do Meio Físico	69
6.1.2 Parâmetros para Análise	69
6.1.3 Simulação da Análise de Fluxo	83
6.2 APLICATIVO CTRAN/W	85
6.2.1 Metais Pesados Analisados	85
6.2.2 Parâmetros para Análise	86
6.2.3 Simulação do Transporte do Contaminante	89
CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

DEDICATÓRIA

Àqueles que me quiseram bem e me apoiaram nos bons e maus momentos;
Àqueles que acreditaram em mim;
Àqueles que, por motivos alheios à minha vontade, não conseguiram me
compreender, nem se fizeram compreender;
Àqueles que criticaram;
Àqueles que, por vários motivos, seguiram por outros caminhos;
Àqueles que me acompanharam na luta diária;
Àqueles que colaboraram de forma direta ou indireta.

AGRADECIMENTO

Baruch Elo-Hêinu shehassimchá bim'onô. Sheacháenu mishelô uvtovó chayénu. (*Bendito é o nome de D'us, em cuja morada há alegria, por cuja bondade comemos e por cuja generosidade vivemos*);

Aos meus avós pela experiência;

Aos meus pais pela vida;

Aos meus irmãos pela união;

A minha esposa, eng.^a *Patricia Helena Azevedo Fantinatti* pelo amor, carinho e dedicação, bem como pelo incentivo e ajuda profissional nas horas difíceis;

Aos meus filhos *Raphael A. Fantinatti, Luiza A. Fantinatti, Vitória A. Fantinatti* e *Ephran A. Fantinatti* pelo amor e compreensão nas horas de ausência;

Aos meus amigos e colegas pela caminhada;

A todos os professores do programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UENF pelos ensinamentos e companheirismo;

Ao meu orientador, prof. *Sérgio Tibana* pelas orientações e cobranças, bem como pela confiança e amizade;

À profa. *Maria Cascão* da UFRJ pela colaboração, mesmo a distância;

Aos técnicos e funcionários do Laboratório de Engenharia Civil da UENF pelo suporte técnico e colaboração;

À FAPERJ pelo apoio financeiro;

À UENF pela bolsa de estudo.

RESUMO

O presente estudo tem como principal objetivo avaliar a dinâmica de fluxo e o transporte de contaminantes da Área de Disposição dos Resíduos Sólidos Urbanos (ADRSU) denominada Lixão da CODIN, para as áreas circunvizinhas. A área em estudo está localizada no Condomínio Industrial do município de Campos dos Goytacazes no estado do Rio de Janeiro, e é cercada por córregos e lagoas, um Centro de Integração de Ensino Público (CIEP 332), loteamentos e assentamentos, ocupando 200.000 m², estando a mesma inserida em uma bacia de drenagem de aproximadamente 3.000 km². A área possui precipitações médias anuais de 900 mm e relevo suavemente ondulado. A implantação do mesmo ocorreu no início da década de 80, e a disposição diária de resíduos sem qualquer preocupação em preservar os recursos naturais existentes, principalmente as que ocorriam no setor de cotas mais baixas, na área de inundação do sistema lacustre, possivelmente colaboraram para disseminação dos contaminantes. A área em questão já foi objeto de estudo de diversos trabalhos realizados por Araruna et al. (2001), Santos Jr. (2002), Monteiro (2002), Tibana et al. (2003) e Almeida et al. (2004). A metodologia aplicada contou com a realização de atividades de campo: execução de seis furos de sondagens a trado onde foram coletadas de vinte e seis amostras de solo, as quais foram submetidas a ensaios de caracterização tátil-visual, instalação e levantamento planialtimétrico da instrumentação (piezômetros, níveis d'água e limnímetros) para o monitoramento das cargas hidráulicas e ensaios de permeabilidade *in situ* empregando permeômetros de carga variável e de carga constante (Guelph); bem como realização de atividades de laboratório: ensaios de caracterização física (análise granulométrica, limites de Atterberg, massa específica dos grãos e umidade natural), caracterização química (CTC, pH, MO, Cu e Zn) e de difração por raios-X (EDX) das referidas amostras de solo. Para as simulações de dinâmica de fluxo e de transporte do contaminante, foram utilizados os aplicativos SEEP/W e CTRAN/W ambos da GEO-SLOPE International.

Palavras-chave: Simulação numérica, Transporte de contaminantes, Dinâmica de fluxo, Permeabilidade *in situ*, Caracterização físico-química do solo, Monitoramento.

ABSTRACT

The present study aims at showing the groundwater seepage analysis carried out in order to assess the transport of pollutant of the Solid Waste Disposal Site (ADRSU) denominated Lixão of CODIN, for the surrounding areas. The area in study is located in the Industrial Condominium of the municipal district of Campos of Goytacazes in the state of Rio de Janeiro, and it is surrounded by streams and ponds, a Center of Integration of Public Teaching (CIEP 332), divisions into lots and establishments, occupying 200.000 m², being the same inserted in a drainage basin of approximately 3.000 km². The area possesses annual medium precipitations of 900 mm and relief smoothly wavy. The implantation of the same happened in the beginning of the 80's, and the daily disposition of residues without any concern in preserving the existent natural resources, mainly the ones that happened in the section of lower quotas, in the area of flood of the lacustrian system, possibly they collaborated for spread of the pollutant ones. The area in subject was already object of study of several works accomplished by Araruna et al. (2001), Santos Jr. (2002), Monteiro (2002), Tibana et al. (2003) and Almeida et al. (2004). The applied methodology counted with the accomplishment of field activities: execution of six holes of auger boring where they were collected of twenty-six soil samples, installation the system (piezometers, levels water and water level gauger) for the monitoring of the hydraulic loads and rehearsals of permeability in situ using permeameter falling head and constant head (Guelph); as well as accomplishment of laboratory activities: rehearsals of physiochemical characterization of the referred soil samples. SEEP/W and CTRAN/W, *software*, from GEO-SLOPE were used to model groundwater seepage.

Keywords: Numeric simulation, Transport of pollutant, flow Dynamics, Permeability in situ, physiochemical Characterization of the soil, Monitoring.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A elaboração da Agenda 21 foi um dos resultados mais importantes da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento – Rio 92. É um programa social e ambiental global que traz mais de 2500 recomendações práticas para conciliar o desenvolvimento com o ambiente natural, ampliando o conceito de desenvolvimento sustentável. Oferece políticas e programas no sentido de se obter uma sinergia entre o consumo, população e capacidade de suporte do nosso planeta.

O acentuado processo de crescimento experimentado pelos países desenvolvidos e em desenvolvimento, vem acarretando transformações profundas no cotidiano das populações. Os problemas ambientais são uma consequência da busca do que se entende hoje por praticidade e melhor qualidade de vida, originando maior diversidade, quantidade e qualidade dos resíduos.

Apesar da conscientização da necessidade de preservação do ar e dos problemas de aquecimento da terra, o homem custou a perceber que a água e o solo também precisavam ser preservados, para que as gerações futuras possam viver em um ambiente tecnicamente limpo.

O ar que respiramos, a água que bebemos e os nutrientes que consumimos dependem do ambiente geológico, que podemos controlar somente de forma parcial. Como lutamos para nos adequar a um mundo de 10 bilhões de pessoas, um melhor entendimento acerca dos processos pelos quais o ambiente natural influencia a nossa saúde, deverá permitir decisões mais apropriadas no futuro. É consenso geral que as mudanças globais estão relacionadas aos poderosos impactos produzidos pelo homem ao meio ambiente.

A problemática do lixo no meio urbano abrange alguns aspectos relacionados à sua origem e produção, assim como o conceito de inesgotabilidade e os reflexos de comprometimento do meio ambiente, principalmente a poluição do solo, do ar e dos recursos hídricos.

Sumariamente, pode-se dizer que o lixo urbano resulta da atividade diária do homem em sociedade e que os fatores principais que regem sua origem e produção são, basicamente, dois: aumento populacional e a intensidade da industrialização. Observando o comportamento destes fatores ao longo do tempo, verifica-se que

existem fortes interações entre eles. Por exemplo, o aumento populacional exige maior incremento da produção de alimentos e bens de consumo direto. A tentativa de atender esta demanda faz com que o homem transforme cada vez mais matérias-primas em produtos acabados, gerando, assim, maiores quantidades de resíduos que, dispostos inadequadamente, comprometem o meio ambiente. Assim sendo, o processo de industrialização constitui-se em um dos fatores principais da origem e produção de lixo.

O fato mais preocupante é que a população mundial está crescendo em ritmo acelerado, esperando-se que duplique nos próximos vinte ou trinta anos. Isso implica na expansão automática da industrialização – pois maiores quantidades de alimentos e bens de consumo serão necessárias para atender a esta nova e surpreendente demanda – o que irá gerar inevitavelmente consideráveis volumes de lixo. O não tratamento dessa massa pode contribuir significativamente para a degradação da biosfera, sendo a consequência disso a poluição e a redução da qualidade de vida em nosso planeta.

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básica (PNSB), realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população brasileira é de aproximadamente 170 milhões de habitantes, produzindo diariamente cerca de 126 mil toneladas de resíduos sólidos.

A geração de resíduos sólidos domiciliares no Brasil é cerca de 0,6 kg/hab/dia e mais 0,3 kg/hab/dia de resíduos de varrição, limpeza de logradouros e entulhos. Ademais grande parte dos resíduos gerados no país não é regularmente coletada, permanecendo junto às moradias, ou sendo vazadas em logradouros públicos, terrenos baldios, encostas e cursos d'água (IBAM, 2001).

Quanto à destinação final, os dados relativos às formas de disposição de resíduos sólidos distribuídos de acordo com a população dos municípios, obtidos com a PNSB indicam que 63,6% dos municípios brasileiros depositam seus resíduos sólidos em “lixões”, somente 13,8% informam que utilizam aterros sanitários e 18,4% dispõem seus resíduos em aterros controlados, totalizando 32,2%. Os 5% dos entrevistados restantes não declaram o destino de seus resíduos. Verifica-se também que a destinação mais utilizada ainda é o depósito de resíduos sólidos a céu aberto na maioria dos municípios com a população inferior a 10000 habitantes, considerados de pequeno porte, correspondendo à cerca de 48% dos municípios brasileiros. Nesses municípios, 63,6% dos resíduos sólidos coletados são

depositados em lixões, enquanto 16,3% são encaminhados para aterros controlados (IBGE,2000b)

Uma outra questão atual, posto pela falta de uma política de gerenciamento apropriada praticada ao longo de décadas, é a recuperação das áreas utilizadas para disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU). A degradação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, a contaminação do solo, os prejuízos à fauna e flora são na maioria dos casos irreversíveis. Dentre as possíveis formas de contaminação, destaca-se a causada pela infiltração de chorume, resultante da percolação de água de chuva na massa de RSU e da decomposição de matéria orgânica (FANTINATTI NT. et al., 2006).

Dentre as possíveis formas de contaminação presentes em áreas de disposição final de RSU, destaca-se a causada pela infiltração de espécies de metais pesados. Estes elementos, cuja densidade atômica é maior que $6,0 \text{ g/cm}^3$, são pertencentes aos grupos de Transição e Não-Transição da tabela periódica dos elementos químicos e, em geral, são associados com poluição e toxicidade. Os metais pesados também podem ser designados como “elementos traços”, tendo em vista as pequenas concentrações, freqüentemente abaixo de 100mg/kg , em que esses elementos se encontram na crosta terrestre (DA TRINDADE et al., 2006).

Considerando que a disposição inadequada de resíduos sólidos constitui uma ameaça à saúde pública e agrava a degradação ambiental, comprometendo a qualidade de vida das populações, é evidente a necessidade de se promover uma gestão adequada, a fim de prevenir ou reduzir os possíveis efeitos negativos sobre o meio ambiente e os riscos para a saúde humana. Levando em consideração esta necessidade, as medidas devem ser adotadas de modo a evitar o abandono ou a disposição descontrolada dos resíduos.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A área em questão já foi objeto de estudo de diversos trabalhos. Araruna Jr. et al. (2001) obtiveram resultados das análises físico-químicas nas amostras de solo coletadas nas sondagens a percussão, as quais apresentaram teores de metais pesados (Al, Ba, Pb, Cu, Cr, Sn, Fe, Mn, V e Zn) abaixo dos toleráveis pelas agências ambientais. Analogamente Santos Jr. (2002) em sondagens a percussão e a trado, também apresentou baixos teores de metais pesados (Al, Pb, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni e Zn) nas amostras de solo coletadas bem como Tibana et al. (2003) em

sondagens a trado em coletas de solo para análise de teor de metais pesados (Al, Si, Fe, Zn e Cu).

Contraditoriamente, os resultados obtidos por Monteiro (2002) detectavam, por meio de investigações geofísicas eletromagnéticas, plumas de contaminação com altas concentrações de metais pesados, as quais se evidenciavam nas camadas mais próximas da superfície.

Posteriormente identificou-se por meio dos resultados obtidos por Almeida et al. (2004) nas análises físico-químicas das amostras da água superficial coletada na lagoa ao entorno da ADRSU e da água subterrânea coletada nos poços de monitoramento instalados nas áreas circunvizinhas com elevados teores de metais pesados (Al, Cd, Cu e Zn) em comparação com os valores fixados pelas agências ambientais.

Analisando os resultados dos trabalhos realizados anteriormente na área de estudo, pôde-se diagnosticar que a contaminação por metais pesados não ocorreu no solo (ARARUNA JR. et al., 2001, SANTOS JR., 2002) e sim na água (ALMEIDA et al., 2004), sendo as plumas de contaminação identificadas próximas à superfície do solo (MONTEIRO, 2002). Sugerindo assim, que o transporte do contaminante esteja ocorrendo por advecção na água subterrânea, através de uma camada mais permeável do subsolo, possivelmente carreando os metais pesados da ADRSU para outras áreas circunvizinhas.

1.3 OBJETIVO

Este estudo tem como objetivo identificar o padrão de fluxo da água subterrânea e o transporte de contaminantes que possivelmente está ocorrendo da ADRSU para outras áreas circunvizinhas. Os estudos serão realizados mediante a execução de atividades de campo, análises laboratoriais e numéricas. Constituem como atividades experimentais, a realização de ensaios de sondagens a trado para coleta de amostras de solo para análises físicas e químicas, instalação da instrumentação para o monitoramento da dinâmica das águas subterrâneas e superficiais (*piezômetros, níveis d'água e limnímetros*), com levantamento planialtimétrico da área, e realização de ensaios para determinação da permeabilidade *in situ* do solo, bem como simulações numéricas de fluxo e de transporte do contaminante utilizando os aplicativos SEEP/W (GEOSLOPE, 1998a) e CTRAN/W (GEOSLOPE, 1998b).

1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O presente trabalho é apresentado em oito capítulos, sendo este o primeiro, onde os demais estão descritos da seguinte forma:

Capítulo II – Pesquisa Bibliográfica: apresenta-se uma breve revisão dos temas degradação dos resíduos sólidos urbanos, geração de lixiviados, transporte de contaminantes, geoquímica dos metais pesados e estudos de referência;

Capítulo III – Área de Estudo: descreve-se a localização, aspectos ambientais, geologia, pedologia, geomorfologia, hidrogeologia e a pluviometria da área estudada;

Capítulo IV – Metodologia: identifica-se os procedimentos de execução e os equipamentos utilizados em cada uma das atividades de campo e de laboratório, bem como das simulações numéricas;

Capítulo V – Resultados e Discussões: discute-se os resultados obtidos na caracterização do meio físico e na análise geoquímica realizadas na área de estudo;

Capítulo VI – Simulação Numérica: apresenta-se as simulações de fluxo com o aplicativo SEEP/W e as simulações de transporte de contaminantes com o aplicativo CTRAN/W ;

Capítulo VII – Conclusões e Sugestões: demonstra-se as principais conclusões a que se pode chegar e as sugestões para trabalhos futuros.

2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

2.1 GERAÇÃO DE LIXIVIADOS

O lixiviado ou chorume define-se como o líquido resultante da infiltração da água na massa de RSU do aterro, possuindo odor e cor característicos e elevada DBO (ABNT/NBR 8419, 1992). O processo de percolação em aterros sanitários é definido como a quantidade de água que excede a capacidade de retenção da umidade do material alterado representado pelos resíduos sólidos (TCHOBANOGLOUS et al., 1993). Segundo Araújo et al. (2006), os lixiviados são gerados pelo processo de degradação do lixo e pela passagem de águas da chuva, através do meio poroso.

Os estudos hidrológicos são úteis para avaliação do potencial de risco dos recursos hídricos locais pelas ADRSU. As informações climáticas permitem medir a precipitação, evapotranspiração, evaporação, umidade relativa do ar, temperatura, pressão atmosférica, direção e velocidade do vento. Dados estes que auxiliam o processo de monitoramento do aterro, uma vez que permite avaliar o avanço da pluma de contaminação (MONTEIRO & JUCÁ, 2000).

O ciclo hidrológico representa uma globalização simplificada das interações complexas dos fenômenos meteorológicos, biológicos, químicos e hidrogeológicos (WANIELISTA, et al., 1997). O movimento da água da superfície, do subterrâneo e da vegetação para a atmosfera e de volta para Terra sob forma de precipitação define a trajetória do ciclo hidrológico. O ciclo é o processo natural de evaporação, condensação, precipitação, detenção e escoamento superficiais, infiltração, percolação da água no solo nos aquíferos, escoamentos fluviais e interações entre esses componentes (RIGHETTO, 1998).

Dentre os parâmetros mais importantes a serem avaliados estão: regime de fluxo das águas subterrâneas; escoamento das águas superficiais; precipitação e evapotranspiração; e hidrogeologia local.

Ao ser drenado do aterro, esses líquidos resultantes da mistura das duas fontes, carrega materiais em suspensão e dissolvidos. O Total de Sólidos Dissolvidos – TDS do chorume além de ser bastante alto, pode ainda conter muitos contaminantes inorgânicos e orgânicos, como pode ser observado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Faixas de variação dos teores de substâncias contaminantes dissolvidas no chorume.

PARÂMETRO	FAIXA DE VARIAÇÃO (mg/ℓ)
K ⁺	200-1000
Na ⁺	200-1200
Ca ²⁺	100-3000
Mg ²⁺	100-1500
Cl ⁻	300-3000
SO ₄ ⁻²	10-1000
Alcalinidade	500-10000
Fe _{total}	1-1000
Mn	0,1-100
Cu	< 10
Ni	0,01-1
Zn	0,1-100
Pb	< 5
Hg	< 0,2
NO ₃ ⁻	0,1-10
NH ₄ ⁺	10-1000
COTD *	200-30000
DQO	1000-90000
STD **	5000-40000
pH	4-8

* Carbono Orgânico Total Dissolvido. ** Sólidos Totais Dissolvidos.

Fonte: Freeze & Cherry (1979)

Os estudos hidrológicos são úteis para avaliação do potencial de risco dos recursos hídricos locais pelas ADRSU. As informações climáticas permitem medir a precipitação, evapotranspiração, evaporação, umidade relativa do ar, temperatura, pressão atmosférica, direção e velocidade do vento. Dados estes que auxiliam o processo de monitoramento do aterro, uma vez que permite avaliar o avanço da pluma de contaminação (MONTEIRO & JUCÁ, 2000).

O ciclo hidrológico representa uma globalização simplificada das interações complexas dos fenômenos meteorológicos, biológicos, químicos e hidrogeológicos (WANIELISTA, et al., 1997). O movimento da água da superfície, do subterrâneo e da vegetação para a atmosfera e de volta para Terra sob forma de precipitação define a trajetória do ciclo hidrológico. O ciclo é o processo natural de evaporação,

condensação, precipitação, detenção e escoamento superficiais, infiltração, percolação da água no solo nos aquíferos, escoamentos fluviais e interações entre esses componentes (RIGHETTO, 1998).

Dentre os parâmetros mais importantes a serem avaliados estão: regime de fluxo das águas subterrâneas; escoamento das águas superficiais; precipitação e evapotranspiração; e hidrogeologia local.

2.2 TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

A contaminação do subsolo de aterros de disposição de RSU se deve, principalmente à ação da água percolante que é o agente transportador mais importante de contaminantes pelo subsolo.

São diversas as causas do transporte de contaminantes em meios porosos e diversos também os tipos de fontes contaminantes, necessitando-se conhecer então, as condições do meio, contaminação e fluxo, além das propriedades do contaminante e do solo.

O movimento de contaminantes depende também de mecanismos, que dependem de processos físicos, químicos e biológicos aos quais essas substâncias são submetidas. Porém, a maior parte dos modelos de transporte de contaminantes em meios porosos, utilizados na prática considera somente os processos físicos de advecção, dispersividade hidrodinâmica e os processos químicos de sorção e decaimento radioativo.

2.2.1 Processos Físicos

Advecção: É o principal mecanismo de transporte de contaminante, e é causado pelo fluxo de água. Neste caso, o contaminante dissolvido move-se com a mesma velocidade e direção do fluido, sem alterar a sua concentração (COELHO et al, 2003b).

Dispersão Hidrodinâmica: Na dispersão hidrodinâmica há a presença de dois fatores, onde o contaminante pode ser incorporado ao fluxo subterrâneo, denominados: Dispersão Mecânica e Difusão Molecular.

Dispersão Mecânica: A dispersão mecânica é função da velocidade de fluxo e deve depender também das características geométricas do meio

poroso. Ocorre geralmente no sentido do fluxo, e é caracterizado por um espalhamento do contaminante que recebe o nome de pluma. O parâmetro que representa este mecanismo de transporte é o coeficiente de dispersividade, α (DA FONTOURA, DE CAMPOS & NOBRE, 1987). Esse coeficiente aumenta proporcionalmente a distância entre a fonte e o ponto de observação porque o traçador encontra mais heterogeneidades da macroescala do aquífero. O valor do coeficiente de dispersividade é uma medida de nossa ignorância sobre o fenômeno de fluxo heterogêneo no aquífero (passim PORTO et al., 1991).

Difusão molecular: É caracterizado por um espalhamento do material quando há uma diferença de concentração, em que a espécie migra do ponto de maior concentração para o de menor concentração (PINTO, 1976). É representada pelo coeficiente de difusão molecular efetivo, D_e , descrita por (2.1).

$$D_e = \tau D_0 \quad (2.1)$$

onde, D_0 é o coeficiente de difusão molecular em solução livre, e τ é o fator de tortuosidade.

O fator de tortuosidade, τ , considera a maior distância de transporte e os caminhos mais tortuosos efetuados pelo contaminante, e tem valor numérico menor do que 1,0. Adotam-se valores compreendidos entre 0,1 e 0,4 para solos com granulometria mais fina; podendo se expandir este intervalo para aproximadamente 0,5 a 0,7, caso os grãos aumentem de tamanho (GERMANO, 2001 apud SHACKELFORD et al., 1998).

Valores do coeficiente de difusão em solução livre, D_0 , são apresentados no Quadro 2.1, para alguns íons em diluição infinita na água (REDDI & INYANG, 2000). Estes valores representam, de modo geral, os valores máximos medidos em qualquer situação de campo ou de laboratório (RITTER et al., 1995).

Quadro 2.1 Coeficiente de difusão em solução livre

Íon	D_0 (10^{-6} cm ² /s)
OH ⁻	52,80
F ⁻	14,7
Cl ⁻	20,30
Br ⁻	20,80
I ⁻	20,40
HCO ₃	11,87
NO ⁻³	19,00
SO ₄ ⁻²	10,60
CO ₃ ⁻²	9,22
H ⁺	93,10
Li ⁺	10,30
Na ⁺	13,30
K ⁺	19,60
Rb ⁺	20,70
Cs ⁺	20,50
Be ⁺²	5,98
Mg ⁺²	7,05
Ca ⁺²	7,92
Sr ⁺²	7,90
Ba ⁺²	8,46
Pb ⁺²	9,25
Cu ⁺²	7,13
Fe ⁺²	7,19
Cd ⁺²	7,17
Zn ⁺²	7,02
Ni ⁺²	6,79
Fe ⁺³	6,07
Cr ⁺³	5,94
Al ⁺³	5,95

Valores correspondentes à diluição infinita em água a 25°C

Fonte: REDDI & INYANG (2000)

2.2.2 Processos Químicos

Sorção: Consiste na partição das espécies químicas entre as fases líquidas e sólidas, onde as moléculas dissolvidas deixam a fase líquida e entram na fase sólida. A partição continua até que um equilíbrio seja atingido.

Matematicamente é um fenômeno de retardamento em que a velocidade das espécies químicas é menor que a da água subterrânea. O retardamento é

caracterizado por um parâmetro chamado fator de retardamento, R_d . Este fator é adimensional, e representa a velocidade da água subterrânea em relação à velocidade de transporte de um contaminante, e é dado por (2.2).

$$R_d = 1 + \frac{\delta}{\theta} K_d \quad (2.2)$$

em que δ é a densidade da matriz sólida do meio poroso, θ é o teor volumétrico de água, que no meio saturado este valor equivale a porosidade η , e K_d é o coeficiente de distribuição e indica a partição da massa total do contaminante, por unidade de volume do meio poroso, entre a quantidade adsorvida na superfície dos grãos e a quantidade que permanece em solução na fase fluida.

Decaimento Radioativo : É a diminuição da atividade radioativa de uma amostra de material ao longo do tempo. O decaimento radioativo é medido em desintegração por segundo e é causado pela emissão de energia do núcleo de elementos instáveis, denominados radionuclídeos, que tendem naturalmente a um estado de energia mais baixo, e conseqüentemente mais estáveis.

2.3 GEOQUÍMICA DOS METAIS PESADOS

Os metais estão definidos como qualquer elemento que tem um lustre prateado e é bom condutor de calor e eletricidade. Há muitas condições que descrevem as categorias dos metais, quanto à localização, metais de transição, micronutrientes, metais tóxicos e metais pesados.

A concentração média de metais nos solos é listada na Tabela 2.2. Todos os solos contêm naturalmente níveis de metais. A presença de metais em solo não é, então, indicativo de contaminação. A concentração de metais no solo é relacionada principalmente à geologia do material da qual o solo foi formado. Dependendo da geologia, a concentração de metais em um solo pode exceder os valores listados na Tabela 2.2. Somente analisando-se pontos de *background* pode-se determinar a contaminação real por metais no solo.

A mobilização de metais por mecanismos de adsorção e precipitação pode prever o seu movimento na subsuperfície. A interação solo-metal é que introduz metais no solo, verticalmente para baixo. Porém, esse movimento não ocorre em grandes extensões a menos que a capacidade de retenção do solo esteja esgotada, o que melhoraria a mobilidade do metal. Caso haja mudanças nas condições do solo, como teor de matéria orgânica, pH, potencial redox, etc devido a processos de

remediações e/ou de intemperismo pode alterar a mobilidade dos metais no solo. A extensão da contaminação vertical é relacionada diretamente com a solução presente no solo, geoquímica do solo e a mobilidade no solo.

Tabela 2.2 Concentrações de alguns elementos no solo

Metal	Média para solos mg/kg	Gama comum para solos mg/kg
Al	71000	10000 – 300000
Fe	38000	7000 – 550000
Mn	600	20 – 3000
Cu	30	2 – 100
Cr	100	1 – 1000
Cd	0,6	0,1 – 0,7
Zn	50	10 – 300
As	5	1 – 50
Se	0,3	0,1 – 2
Ni	40	5 – 500
Ag	0,05	0,01 – 5
Pb	10	2 – 200
Hg	0,03	0,01 – 0,3

Fonte: USEPA (1999).

2.3.1 Destino de metais no solo

No solo, os metais podem estar, como descrito por USEPA (1999) apud Shuman (1991):

- dissolvidos da solução no solo,
- ocupando sítios de troca em componentes inorgânicos,
- especificamente adsorvidos em componentes inorgânicos,
- associados com o solo e o insolúvel orgânico,
- precipitados como puro ou misturados a sólidos,
- presentes na estrutura de minerais secundários ou
- presentes na estrutura de minerais primários.

Em situações onde foram introduzidos metais no ambiente por ações antrópicas, os destinos dos metais são associados com as primeiras cinco. Metais nativos podem ser associados com quaisquer dos fatores que dependem da história geológica da área. A fração aquosa, e as frações em equilíbrio com seta fração, i.e.,

a fração de troca, é de importância primária quando considerado o potencial de migração dos metais associados com o solo.

Em metais de transição, o tamanho do cátion hidratado não pode ser usado como único meio de prever a afinidade de adsorção visto que a configuração dos elétrons de um metal é um fator importante na adsorção. A Tabela 2.3 traz os resultados de várias pesquisas na afinidade de sorção de metais sobre uma variedade de solos e seus componentes. Embora há uma afinidade mais alta destas superfícies constantemente por Pb e Cu comparando-se com Zn ou Cd, a ordem específica de afinidade de sorção depende das propriedades dos metais, tipo de superfície, e condições experimentais.

Tabela 2.3 Afinidade relativa dos metais no solo e constituintes do solo

Solo ou Componente de Solo	Ordem de Sorção
Goetita	Cu>Pb>Zn>Co>Cd
Óxido de Ferro	Pb>Cu>Zn>Cd
Montimorilonita	Cd=Zn>Ni
Caolinita	Cd>Zn>Ni
Solo	Pb>Cu>Zn>Cd>Ni
Solo	Zn>Ni>Cd
Solo Mineral	Pb>Cu>Zn>Cd
Solo Orgânico	Pb>Cu>Cd>Zn
Solo	Pb>Cu>Zn>Ni

Fonte: USEPA (1999).

2.3.2 Comportamento de metais específicos

Cobre: O Cobre é retido em solos por troca e mecanismos de adsorção específica. Em concentrações tipicamente encontradas em solos naturais, os precipitados de Cu são instáveis. Este pode não ser o caso em sistemas solo-resíduos e a precipitação pode ser um mecanismo importante de retenção. Alguns autores sugerem que um argilo mineral pode servir como troca para Cu em solos não calcáreos. Em solos calcáreos, a adsorção específica de Cu sobre superfícies de CaCO_3 pode controlar as concentrações de Cu em solução (USEPA,1999). Com pode ser observado na Tabela 2.3, o Cu é absorvido a uma maior quantidade por solos e seus constituintes do que os outros metais, com a exceção de Pb. Porém, o cobre tem uma afinidade alta com compostos orgânicos solúveis e a formação destes complexos pode aumentar grandemente a mobilidade de Cu em solos.

Zinco: O Zinco, entre os metais pesados, é o mais solúvel (FEITOSA & MANOEL FLO., 2000). O Zinco é prontamente absorvido por argilo-minerais, carbonatos e hidróxidos de óxidos. A precipitação não é seu mecanismo principal de retenção em solos, devido à solubilidade relativamente alta, mas pode vir a tornar-se o mais importante mecanismo de retenção em sistemas de solo-resíduos (USEPA,1992). Assim como todos os cátions metálicos, a adsorção de Zn aumenta com o pH.

O Zinco hidrolisa em $\text{pH} > 7,7$ e estas espécies hidrolisadas são fortemente adsorvidas pela superfície do solo. O zinco forma complexos com ligantes inorgânicos e ligantes orgânicos que afetam as reações de adsorção com a superfície de solo.

2.4 ESTUDOS DE REFERÊNCIA

2.4.1 ARAÚJO et al. (2006)

o Aterro Metropolitano de Gramacho foi criado em 1978, em uma área de 1.300.000 m², construído a 10 m do nível do mar e situado no bairro Jardim Gramacho, no município de Duque de Caxias, com objetivo de receber resíduos domiciliares dos municípios do Rio de Janeiro, Duque de Caxias, Niterói, São Gonçalo, São João de Meriti e Nilópolis. Devido à ausência de políticas permanentes de saneamento por parte das prefeituras dos municípios mencionados acima, o aterro foi operado de forma deficiente, transformando-se num depósito de lixo a céu aberto, com alto potencial poluidor, tanto para a atmosfera como para o corpo receptor, posto que o chorume produzido escorria para o Rio Iguaçu e o Rio Sarapuí e chegava até a Baía de Guanabara com conseqüências danosas para o meio ambiente.

Avaliou-se o solo do aterro, com ênfase nos processos de sorção e difusão, aliados a técnica da simulação computacional com o objetivo de se construir uma ferramenta de cálculo para análise de impactos ambientais causados pela infiltração de íons do chorume no solo, originados da deposição de lixo urbano.

Esta pesquisa propôs avaliar o processo de transporte de contaminantes no solo através de parâmetros cinéticos de transferência de massa nos quais obteve-se um coeficiente de transferência de massa que melhor representa os fenômenos envolvidos.

As simulações foram realizadas utilizando-se o programa MPHMTTP (*Multi Phase Heat and Mass Transfer Program*) implementado em linguagem Fortran, sendo feita uma simulação para fins comparativos no software POLLUTE.

Os resultados experimentais permitiram o desenvolvimento de um código computacional para simular os possíveis impactos ambientais oriundos da disposição de resíduos sólidos urbano.

2.4.2 MACHADO et al. (2004)

A UFBA – Universidade Federal da Bahia, juntamente com o CEPED-BA – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, USP – Universidade de São Paulo e o CRA-BA – Centro de Recursos Ambientais, desenvolvem o projeto de pesquisa PURIFICA, que teve como objetivo geral obter informações técnicas e de engenharia para auxiliar na proposição de medidas para a remediação das áreas afetado pela extração metalúrgica do metal pesado chumbo na cidade de Santo Amaro da Purificação/BA, através da participação de uma equipe multidisciplinar.

Foram desenvolvidos diversos estudos na área urbana da cidade e na área do entorno da antiga COBRAC – Companhia Brasileira da Cobre, fechada em 1993, que funcionou durante 32 anos produzindo chumbo (Pb), tendo como resíduo a escória de chumbo, que foi utilizada ou disposta de diversas formas, inclusive na pavimentação de ruas. Os estudos enfocaram o grau de contaminação no solo e na água superficial e de sub-superfície, a caracterização do material fonte da contaminação (escória de chumbo) e a caracterização das condições hidrogeológicas do local. Na área urbana foi ainda realizada uma extensa campanha de investigação, composta de entrevistas com os moradores, execução de sondagens a trado e utilização de métodos geofísicos (radar de penetração do solo) para identificação da ocorrência de escória sob a pavimentação das ruas da cidade.

Além da realização de um diagnóstico sobre a contaminação por metais pesados em diversos compartimentos ambientais e análise de possíveis rotas de contaminação, diversas medidas foram propostas para a mitigação do problema.

Os resultados obtidos dos ensaios geotécnicos de laboratório foram utilizados para a realização de algumas simulações numéricas simplificadas com intuito de se verificar a compatibilidade entre os resultados previstos a partir dos aplicativos utilizados e a situação de campo e de se fazer prognósticos do estado de contaminação da área.

Devido à natureza argilosa do solo local, algumas rotas de contaminação, como o transporte em subsuperfície dos poluentes, têm baixa probabilidade de ocorrer. No entanto, valores muitos altos de concentração de chumbo e cádmio foram encontrados para o solo superficial, o que torna mais provável outras rotas de contaminação, como a poeira, ingestão de carne e leite provenientes de animais que pastam em áreas contaminadas, bem como a ingestão de solo por crianças.

2.4.3 COELHO et al. (2003a)

O Aterro de Disposição de RSU de Catas Altas/MG encontra-se a aproximadamente 4 km da zona urbana e totaliza uma área de 38000 m², situando-se a 118 km de Belo Horizonte, região de rico potencial hidrográfico, onde se encontra a Serra do Caraça. Cerca 1250 kg diários de RSU produzidos no município são despejados in natura a céu aberto, para posteriormente serem queimados na própria área do lixão. Esta forma de despejo compromete todo o serviço de administração pública, pois gera problemas ambientais, sanitários, econômicos e sociais ao município.

Inicialmente foi realizada a caracterização do meio físico da ADRSU, envolvendo levantamentos topográficos, execução de sondagens, instalação de poços de monitoramento, realização de ensaios de campo e laboratório.

O programa experimental envolveu a caracterização geotécnica, estudo da geoquímica de metais pesados e determinação de parâmetros de permeabilidade, retenção e transporte de metais pesados. Nesse estudo destacaram-se os seguintes cátions metálicos: Cd²⁺, Cr³⁺, Cu²⁺, e Zn²⁺.

Os resultados da qualidade das águas subterrâneas nos poços de monitoramento indicam, como esperado, não está havendo contaminação do freático e servirão como referência para contínua avaliação dessa contaminação. Para a avaliação da qualidade das águas superficiais nas adjacências do Aterro, foi realizada uma campanha de análises físico-químicas. Os resultados não indicaram a interferência do antigo lixão na qualidade das águas.

Em seguida, foram realizadas simulações numéricas do transporte de alguns metais pesados, utilizando o programa computacional HYDRUS 2D, que avalia o fluxo e o transporte bidimensional de contaminantes em meios porosos saturados e não saturados. O programa trabalha a partir do modelo da advecção/dispersão hidrodinâmica e inclui o efeito dos processos de retardamento. Os resultados das

simulações computacionais associados aos dados do monitoramento de campo permitirão a aferição dos modelos utilizados e a avaliação dos reais níveis de contaminação dos solos e das águas subterrâneas.

Os ensaios de laboratório ,associados às análises numéricas e aos dados de monitoramento de campo, sugerem que dificilmente o lençol freático será contaminado.

2.4.4 COTA, CARVALHO FLO. & BRANCO (2002)

O CDTN – Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear, em parceria com a UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais , vem desenvolvendo o Projeto Hidrogeológico da Bacia do Engenho Nogueira – PROHBEN, abrangendo principalmente terrenos destas duas instituições, na região da Pampulha em Belo Horizonte/MG. A área em estudo situa-se na região metropolitana, estando a maior parte dentro dos limites da Cidade Universitária da UFMG, localizada nas proximidades da Lagoa da Pampulha.

O principal objetivo deste projeto é implantar no local uma bacia hidrogeológica experimental. No âmbito do PROHBEN já foram realizados trabalhos de caracterização geológica/hidrogeológica, modelagem de fluxo e caracterização físico-química, entre outros. Os resultados obtidos na caracterização físico-química das águas subterrâneas da bacia experimental indicaram a presença de concentrações elevadas de fosfato. Com o objetivo de apurar as origens desta contaminação foi desenvolvida a modelagem do transporte de soluto na área, através do gerenciador Visual MODFLOW.

Duas possíveis fontes foram investigadas através da modelagem: o “Galpão do Fósforo e Cal” e o trecho não canalizado do córrego do Engenho Nogueira. Obteve-se uma boa correspondência entre as plumas geradas a partir da simulação das liberações provenientes destas fontes e os valores de concentração medidos. Nenhuma das fontes investigadas justificou os teores de fosfato observados no poço localizado no CDTN. Considera-se que as possíveis fontes para a contaminação observada, sejam vazamentos na rede de esgoto que cruza toda a área monitorada, além dos fertilizantes fosfatados utilizados em jardins. Para o caso avaliado, a análise de sensibilidade realizada para o parâmetro dispersividade longitudinal mostrou pouco efeito nas plumas geradas.

2.4.5 GERMANO (2001)

O Lixão do Município de Viçosa/MG está situado no Morro do Seriquite e situa-se a oito quilômetros do centro urbano. Esta área é utilizada há cerca de 3 anos como depósito de lixo da cidade e tem aproximadamente 15 hectares, pertencendo à bacia do rio Doce, sub-bacia do rio Pitanga e micro-bacia do rio Turvo Sujo.

Neste trabalho, foi realizada uma análise numérica, utilizando o método dos elementos finitos, para avaliar o transporte de contaminante e o nível de contaminação pelos metais pesados Cd, Cu e Pb, na área do Lixão do Município de Viçosa/MG. Foi executado primeiramente um levantamento planialtimétrico da área do lixão e, em seguida, uma prospecção do terreno através dos furos de sondagem à percussão. Amostras deformadas e indeformadas dos solos foram coletadas para ensaios de caracterização, permeabilidade e lixiviação. Pelos resultados alcançados no ensaio de lixiviação (em coluna), foi possível traçar as curvas de eluição de metais pesados nos solos estudados e, através dessas, foram obtidos os parâmetros de transporte R_d e D_h . A partir desses dados, foi possível estimar, em um estudo de 100 anos, as plumas de contaminação de cada metal pesado.

De uma maneira geral, entretanto, pode-se avaliar que a contaminação do lençol freático por metais pesados na região do lixão da cidade de Viçosa/MG, em função da disposição de resíduos sólidos é insignificante, uma vez que os contaminantes analisados só penetraram por um ou dois metros na camada superficial do solo.

3 ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO

A área em estudo situa-se no norte do estado do Rio de Janeiro, em Campos dos Goytacazes (Figura 3.1), o maior município do estado, com extensão territorial de 4.037 km², possuindo uma população estimada de 406.989 habitantes (IBGE,2000a).



Figura 3.1 Localização geográfica da área de estudo

Os estudos concentraram-se no Condomínio Industrial (CODIN), nas coordenadas UTM N 7.597.512,716 e L 263.969,778, localizada cerca de 5 Km a nordeste da cidade de Campos (IBGE, 1965), na ADRSU, denominada “Lixão da CODIN”.

A ADRSU tem aproximadamente 200.000 m² e é circundada por indústrias, pelo Centro de Integração de Ensino Público Pedro Álvares Cabral (CIEP 332), um sistema lacustre, comunidades carentes (Vila Industrial, Jardim Ceasa, Jardim Residencial Planície, Jardim Santa Rosa e Terra Prometida), loteamentos, propriedades rurais e um Complexo Penitenciário (Figura 3.2).



Figura 3.2 Localização por satélite da área de estudo

3.2 ASPECTOS AMBIENTAIS

No Norte Fluminense, destaca-se a Baixada Campista, que consiste em extensa planície deltaica, caracterizada por diversos ambientes deposicionais: destacam-se vastos depósitos fluviolagunares, ou brejos, sendo solos com lençol freático elevado, passível de contaminação. Nesses terrenos inundáveis, onde deve ser evitada urbanização, obras viárias ou disposição de resíduos sólidos. Apresentam solos com altos teores de sais e enxofre, sendo, portanto, altamente limitantes às atividades agropecuárias, e devem manter-se preservados, principalmente junto às lagunas e aos banhados. A baixada fluviodeltaica construída pelo rio Paraíba do Sul, por sua vez, possui solos melhor drenados e bastante férteis (Solos Aluviais e Cambissolos eutróficos), adequados para a expansão das atividades agrícolas. Essa área apresenta um bom potencial hidrogeológico (o aquífero de maior produtividade do Estado do Rio de Janeiro). Tradicionalmente ocupada pela decadente monocultura canaveira, a Baixada Campista pode ser melhor aproveitada como um pólo de fruticultura, assim como os tabuleiros adjacentes. Segundo o DRM/RJ (2001), esses tabuleiros, constituídos por sedimentos terciários do Grupo Barreiras, ocupam vastas porções do município de

Campos, formando terrenos planos ou suave ondulados e solos profundos e bem drenados (Latosolos Amarelos). Apesar desses solos terem uma fertilidade natural baixa, são recomendados para expansão da agricultura irrigada com correção do solo, devido à baixa suscetibilidade à erosão.

Segundo o DRM/RJ (2001), em relação a análises químicas realizadas em água e/ou sedimento de corrente, os resultados apresentam altos teores de elementos nocivos à saúde humana, principalmente nas áreas de drenagem da região (Cu, Zn) e no rio Valão da Onça (Al, Pb, Se, Cu, Zn) localizado a noroeste. Os resultados apontados acima são preocupantes, tendo em vista que se esses elementos quando consumidos em altas quantidades e por vários anos, podem provocar doenças cancerígenas, cardiovasculares, mal de Alzheimer, osteoporose, nanismo, fluorose, hipertensão, osteomacia, disfunção renal, nefrite e deformação dos ossos, entre outras enfermidades.

Por ser uma região onde ocorre constante interação entre o mar e as terras baixas, apresenta-se como um ambiente dinâmico e de extrema fragilidade, agravada pela implantação indiscriminada dos processos antrópicos que afetam o equilíbrio ambiental. Esta região mostra um quadro de estagnação econômica, causado, principalmente, pelo subaproveitamento das terras, com uso quase exclusivo da pecuária extensiva. Grandes áreas que foram e estão sendo desmatadas para a instalação de pastagens apresentam alto índice de erodibilidade, e a remoção dos sedimentos carregados pelas chuvas, além de degradar os solos, estão assoreando o sistema hídrico.

Os principais problemas ambientais que ocorrem nesta região estão, por tanto, relacionados com a ocupação desordenada, despejo de efluentes domésticos e industriais na rede de drenagem, disposição inadequada de resíduos sólidos, desmatamento generalizado para implantação de atividades agropecuárias, tendo como resultantes a contaminação do solo e da água e, conseqüentemente a redução da qualidade de vida.

Neste contexto, a área em questão torna-se inadequada técnica e ambientalmente para a disposição final de resíduos, devido à proximidade de áreas habitadas e propriedades rural com atividades agrícolas na produção de cana-de-açúcar, mandioca e milho, bem como com atividades pecuárias, na produção de leite e gado de corte, causando a proliferação de vetores de doenças, e principalmente

pelo fato da área ter sido implantada junto a um sistema lacustre inserida em uma sub-área de drenagem.

No passado o local contava com um sistema lacustre formado por uma quantidade de lagoas e regiões alagadiças, que atuavam como barreiras geoquímicas naturais. Entretanto, este sistema reduzido gradativamente por ações antrópicas. Essas ações foram causadas principalmente pelo aumento cultivo da cana de açúcar, que provocou o desmatamento de grandes áreas e, por conseqüência, os efeitos das queimadas e da utilização de fertilizantes e agrotóxicos nas lavouras. Também foram causados pelo crescimento desordenado das comunidades carentes localizadas no entorno da ADRSU, onde a grande maioria por não ser atendida por um sistema público de captação e tratamento de esgoto, lança conseqüentemente o seu esgoto in natura no sistema lacustre local.

A implantação do “Lixão da CODIN” ocorreu no início da década de 80, e a disposição diária de resíduos sem qualquer preocupação com a questão ambiental, principalmente as que ocorriam no setor de cotas mais baixas, na área de inundação do sistema lacustre, possivelmente colaboraram para disseminação dos contaminantes. Baseado no sentido de fluxo da bacia de drenagem da área (BIDEGAIN, BIZERRIL & SOFFIATTI, 2002), provavelmente esses contaminantes possam estar sendo carreados através de canais secundários até o canal do Vigário, seguindo por este até Brejo Grande, alcançando a Lagoa do Campelo, podendo seguir posteriormente pelo canal de Guaxindiba (canal Antônio de Resende), já no município de São Francisco de Itabapoana, até a sua foz com Oceano Atlântico (Figura 3.3).

A montante da área de estudo existe a Lagoa do Sapo que provoca alagamento de casas populares construídas às suas margens, sempre que ocorrem precipitações prolongadas ou mesmos as torrenciais de pequena duração. Nestes casos, a prefeitura tem rompido a estrada de acesso pelo lado sul (estrada de terra) à área de disposição de RSU, permitindo a passagem de água, para controlar o nível das lagoas à montante, evitando as inundações. Este procedimento tem provocado alterações nas condições de fluxo da área de estudo, uma vez que a estrada, que corta a bacia hidrográfica (Figura 3.4), tem funcionado como uma barragem de pequena altura.

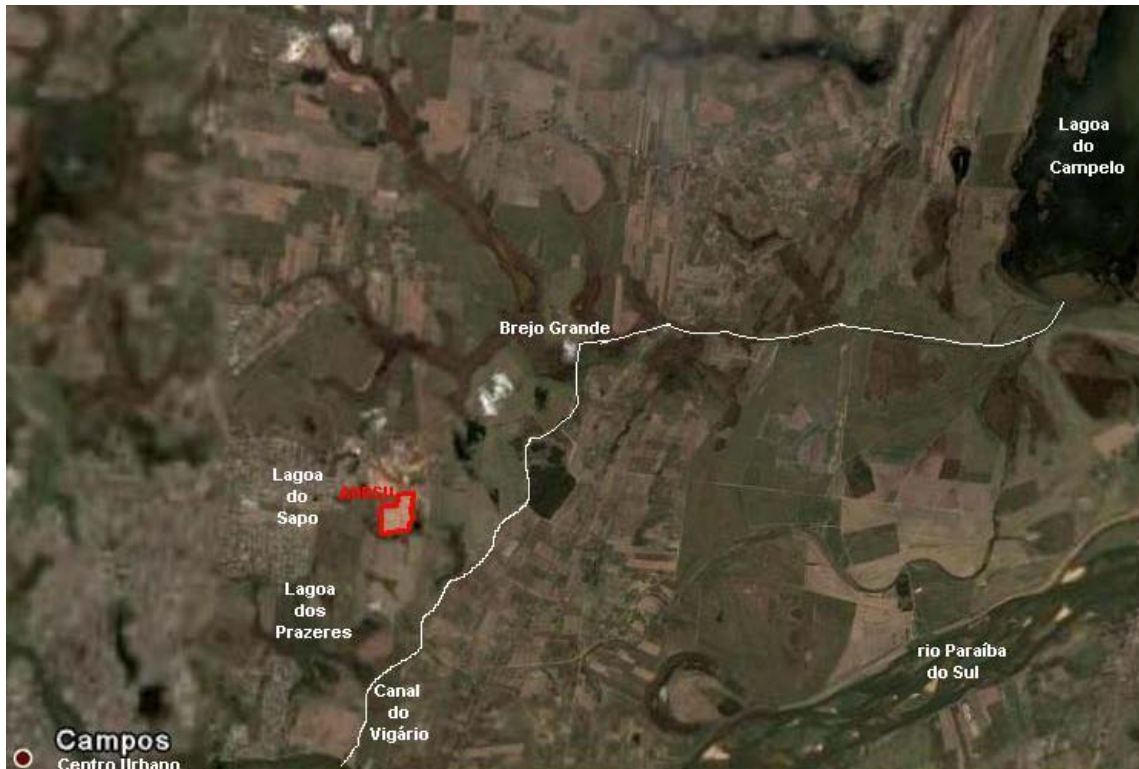


Figura 3.3 Bacia hidrográfica da área de estudo por satélite

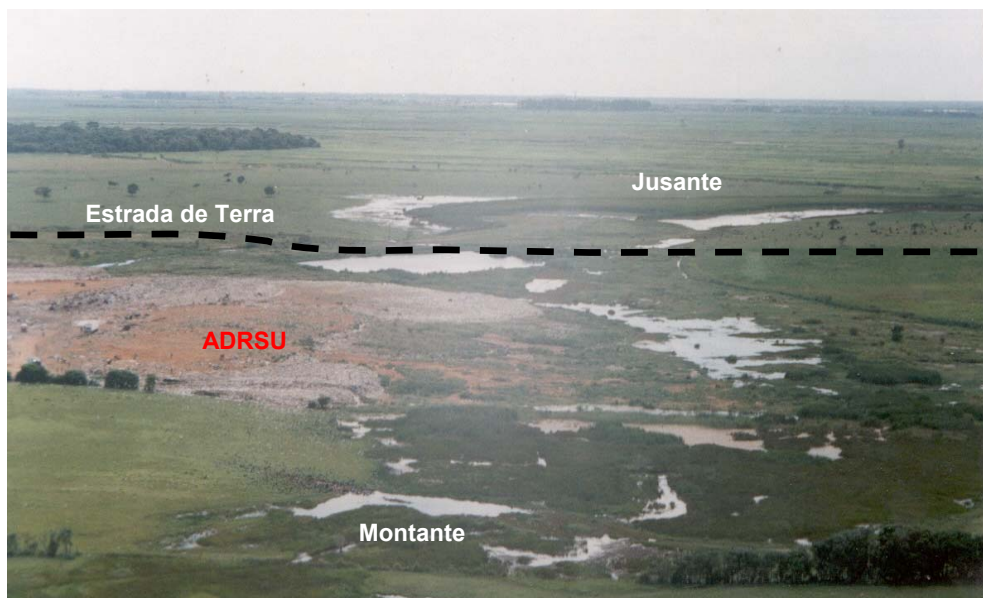


Figura 3.4 Vista aérea da área de estudo

3.3 GEOLOGIA

Segundo o DRM/RJ (2001), os limites geocronológicos da região de Campos dos Goytacazes são determinados por uma Unidade Pré-Cambriana denominada Suíte Bela Joana. A área em estudo situa-se nos denominados Tabuleiros

Terciários, os quais estendem-se por quase toda margem esquerda do Rio Paraíba do Sul.

Na Figura 3.5 está apresentado o mapa geológico da região (DRM/RJ,2001), considerando a diversidade geológica da área em estudo. Na área encontram-se argilas orgânicas de coloração cinza-negra e depósitos de turfa, em lagos, pântanos e brejos, formações superficiais arenosas, areno-argilosas e siltosas com sedimentação fluvial orgânica e ocorrência de cascalheiras, do período quaternário. Os sedimentos do grupo Barreiras estão representados a oeste por níveis descontínuos alternados de material friável e mal selecionado, desde arenoso, areno-argiloso a argiloso, e características de cores variegadas (cinza, marrom, amarela e vermelha) (DRM/RJ,2001).

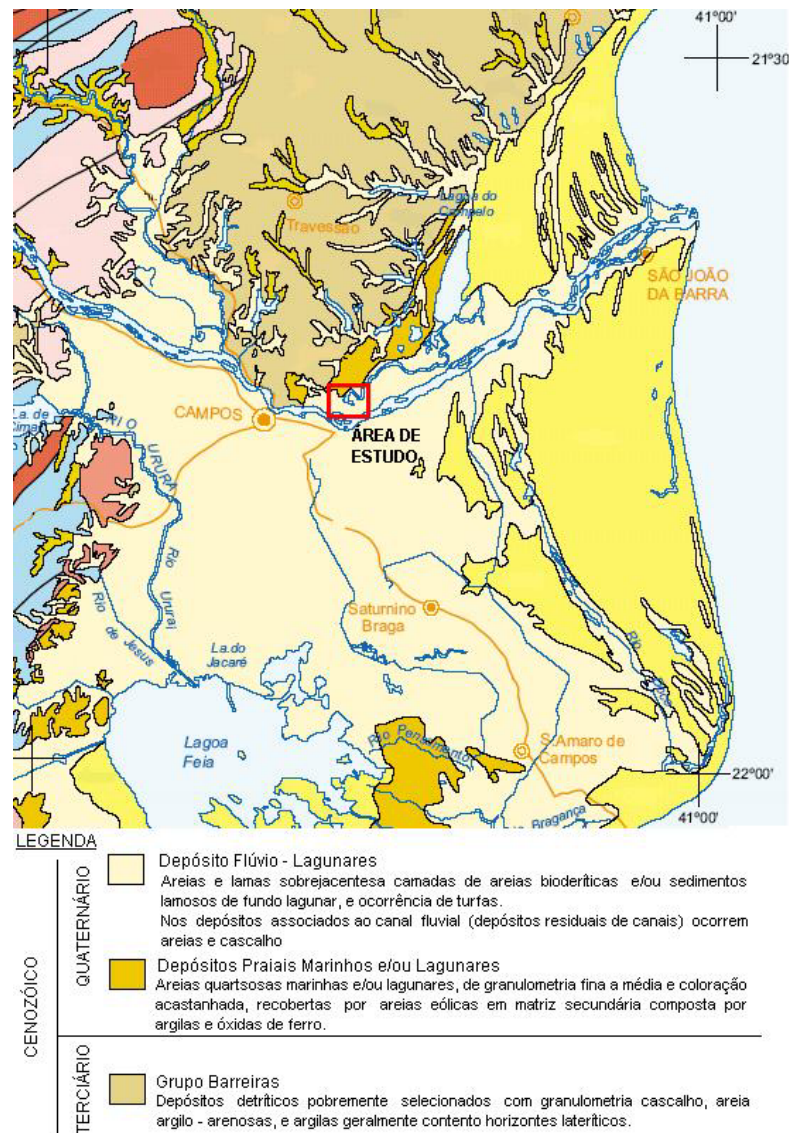


Figura 3.5 Mapa geológico da região (DRM/RJ,2001)

3.4 PEDOLOGIA

A pedologia do local constitui-se de cambissolos associados a solos aluviais eutróficos e latossolos amarelo álico (DRM/RJ,2001) (Figura 3.6). Existe a predominância de cambissolo eutrófico, uma vez que os sedimentos argilosos depositados pelo rio Paraíba do Sul são mais espessos, propiciando o desenvolvimento dos mesmos. São solos minerais, pouco evoluídos, de características bastante variáveis, mas em geral pouco profundos ou rasos e constituídos por elevadas quantidades de argila e silte.

Os solos aluviais são solos minerais pouco evoluídos, desenvolvidos a partir de depósitos aluviais recentes, referidos ao Quaternário. Os latossolos amarelo álico são solos profundos com avançado estado de intemperização, relacionados aos sedimentos terciários do Grupo Barreiras, de elevada permeabilidade, comumente bem acentuadamente drenados, com teores muito baixos de óxido de ferro (Fe_2O_3) e constituição mineralógica essencialmente caulínica.

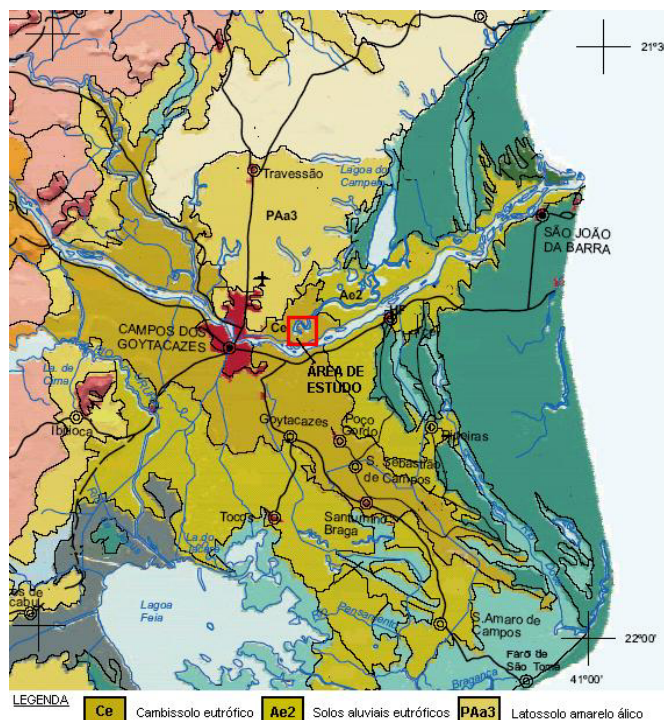


Figura 3.6 Mapa pedológico da região (DRM/RJ,2001).

3.5 GEOMORFOLOGIA

Na Figura 3.7 apresenta-se o mapa geomorfológico, onde se observa que a área de estudo está inserida em um relevo tabular associado a uma planície costeira.

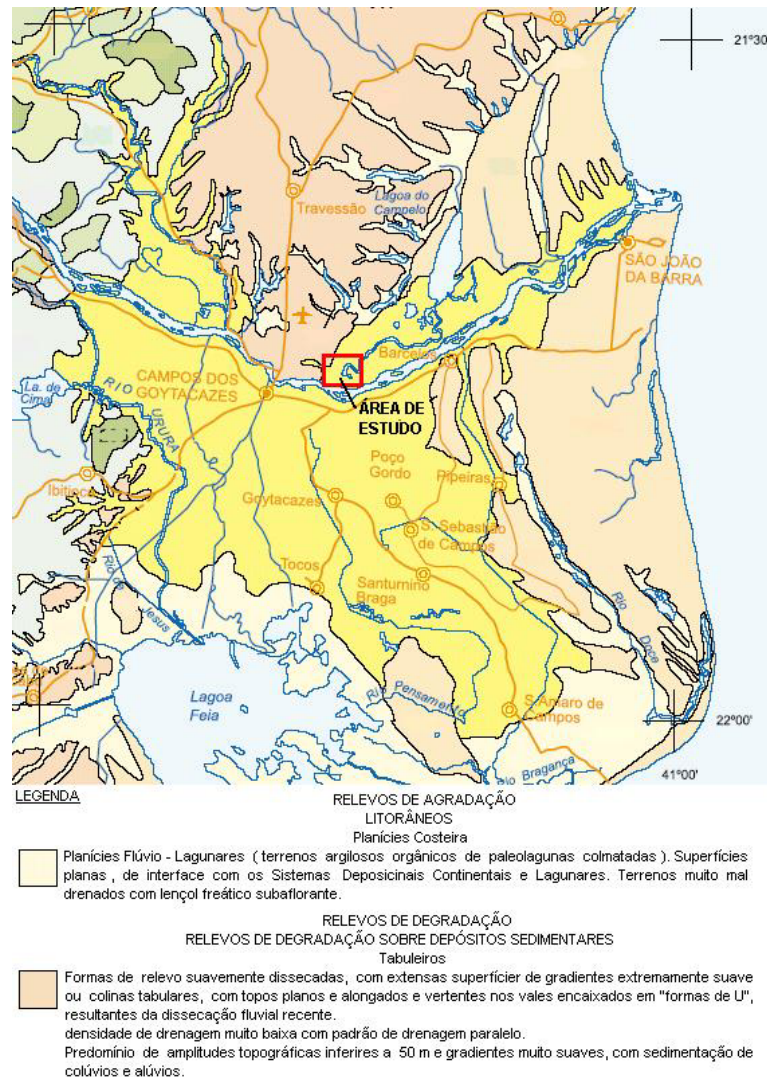


Figura 3.7 Mapa geomorfológico da região (DRM/RJ,2001)

A rede de drenagem que diseca essa superfície tabular consiste em pequenos tributários do rio Paraíba do Sul ou da lagoa do Campelo, ou de rios que drenam diretamente para o oceano. Destaca-se no contato entre os tabuleiros e a Baixada Campista e os cordões arenosos adjacentes à formação de uma série de pequenas lagunas e brejos de conformação estreita e alongada, os quais ocupam antigos fundos de vales fluviais, que foram escavados sobre os sedimentos do Grupo Barreiras em períodos de máxima regressão marinha. A transgressão marinha subsequente elevou o nível de base geral e as desembocaduras desses vales foram tamponadas por intensa descarga de sedimentos fluviais do rio Paraíba do Sul e por sedimentos fluviais e marinhos de sua planície deltaica, promovendo a geração de uma série de lagunas que, ao longo do atual período regressivo, vêm sendo progressivamente colmatadas, transformando-se em brejos (DRM/RJ,2001).

3.6 HIDROGEOLOGIA

A região abrange planícies e terraços fluviais e fluviolacustres, com meandros e paleocanais em estágio de colmatagem, possuindo uma favorabilidade hidrogeológica de média a alta, em áreas moderadamente onduladas (Figura 3.8).

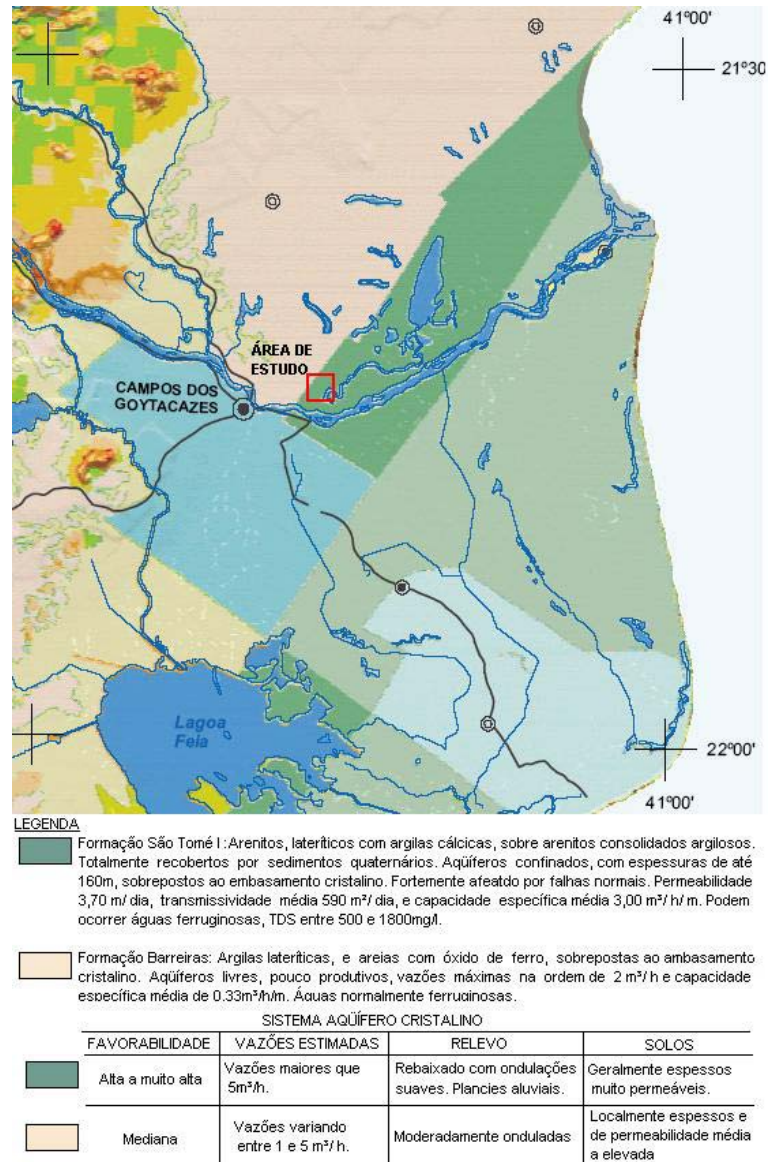


Figura 3.8 Mapa hidrogeológico da região (DRM/RJ, 2001)

A superfície de drenagem da bacia hidrográfica é de aproximadamente 3.000 Km² (BIDEGAIN, BIZERRIL & SOFFIATTI, 2002).

3.7 PLUVIOMETRIA

Deve-se destacar que na região ocorrem em média 900 mm de precipitação anual acumulada (Figura 3.9).

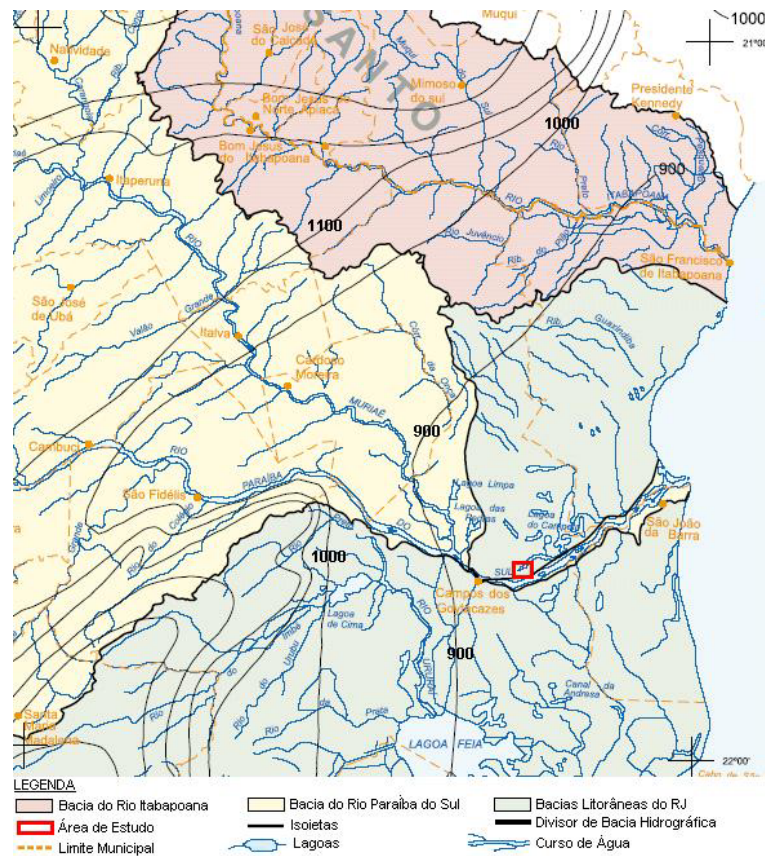


Figura 3.9 Mapa de isoietas da região (DRM/RJ, 2001)

No Gráfico 3.1 é apresentada a precipitação média da região no período de 2004 a 2006. Observa-se que os maiores índices pluviométricos são de novembro até março. Os meses de janeiro, julho e dezembro de 2006 foram atípicos, sendo a precipitação acumulada neste período muito baixa.

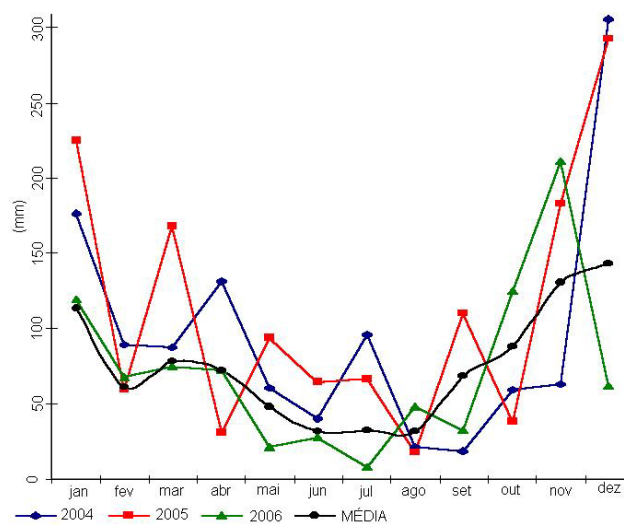


Gráfico 3.1 Precipitação média dos anos de 2004, 2005 e 2006 (UENF – PESAGRO, 2007)

4 METODOLOGIA

4.1 ATIVIDADES DE CAMPO

4.1.1 Sondagem a Trado

Foram executados seis furos de sondagens a trado, em conformidade com a ABNT/NBR 6903 (Figura 4.1) sendo coletadas vinte e seis amostras (Figura 4.2) referentes às camadas de solo do perfil de sondagem de cada furo (NA01, NA02, NA03, PZ109, PZ110 e PZ111) (Figura 4.3).



Figura 4.1 Sondagem a trado



Figura 4.2 Coleta de amostras

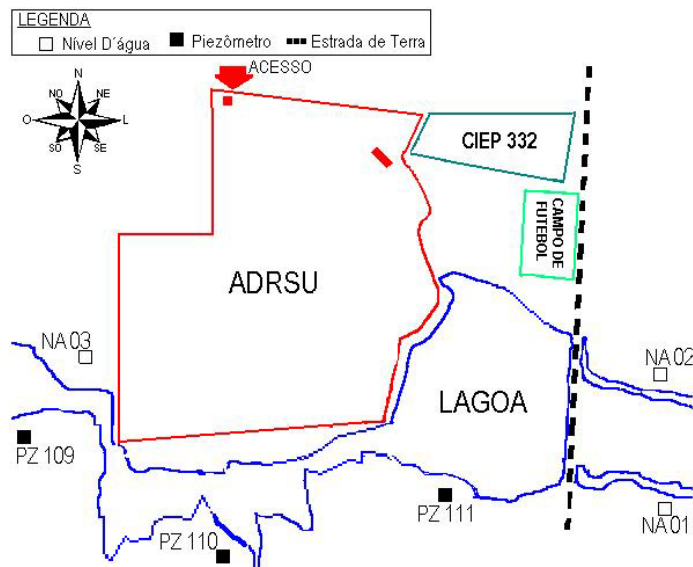


Figura 4.3 Layout da localização dos furos de sondagens a trado

4.1.2 Caracterização tátil-visual

Foram realizados ensaios de caracterização tátil-visual das vinte e seis amostras de solo, em conformidade com a ABNT/NBR 7250 (1982).

4.1.3 Instrumentação

Desde o início das atividades de pesquisa no lixão do CODIN, a hipótese inicial foi a de que o talvegue da bacia hidrográfica seria a área de fuga de possíveis contaminantes, por isto as investigações tem se concentrado neste setor de cotas mais baixas da área de estudo, delimitando a secção do talvegue para as análises de fluxo e transporte de contaminantes.

Inicialmente foram utilizados seis piezômetros (PZ101, PZ102, PZ103, PZ104, PZ106, e PZ108) que já se encontravam instalados na área de estudo (ALMEIDA et al., 2004), com o objetivo de monitoramento das cargas piezométricas. No segundo semestre do ano de 2005, foram confeccionados e instalados três piezômetros (PZ109, PZ110 e PZ111) e três níveis d'água (NA01, NA02 e NA03), para um monitoramento mais específico da dinâmica das águas subterrâneas, bem como a instalação de dois limnímetros, sendo um na lagoa a montante (LN01) e outro no córrego a jusante (LN02) da estrada de terra (barragem de pequena altura), com o objetivo não somente de monitorar as cargas hidráulicas superficiais, mas principalmente para obtenção de referências para variação das cargas hidráulicas subterrâneas (Figura 4.4).

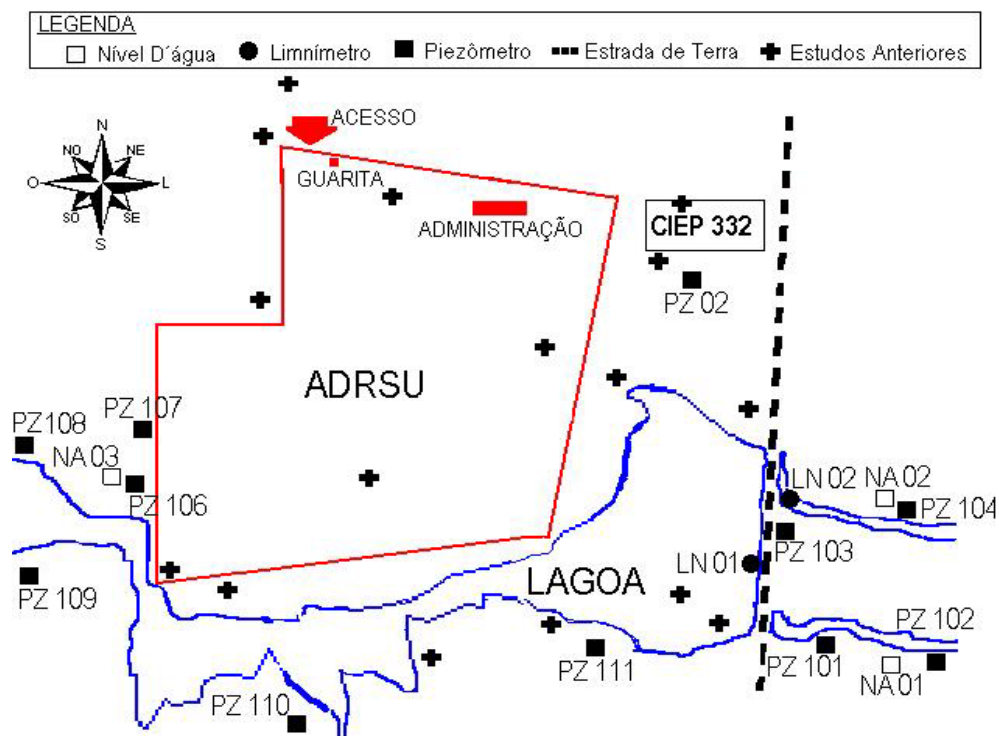


Figura 4.4 Lay-out da área em estudo com a localização da instrumentação e da secção estudada

Piezômetro: Foram confeccionados em tubos de PVC série R com diâmetro de 50 mm, e instalados nos respectivos furos de sondagens a trado, em conformidade com os procedimentos descritos a seguir (Figura 4.5):

Pré-Filtro: É a areia lavada (calibrada) com granulometria superior a malha do filtro, aplicada no espaço anular entre o filtro e a parede da perfuração;

Filtro: É o trecho da extremidade inferior do tubo de PVC que é perfurado e envolto por uma tela de nylon de malha inferior a granulometria da areia lavada utilizada no pré-filtro (Figura 4.6);

Selo: Camada de bentonita no espaço anular acima do pré-filtro (limite máximo do nível d' água) para impedir que a água percole pela parede externa do tubo e atinja a camada saturada;

Preenchimento: O espaço anular da zona não saturada deve ser preenchida com material impermeável (argila ou solo da perfuração) a fim de firmar o tubo e dificultar a percolação de líquidos da superfície;

Proteção Sanitária: Para evitar que a água superficial contamine o poço através da infiltração pelo espaço anular entre a escavação e o tubo, deve ser feito um preenchimento com argamassa de cimento e areia na extremidade superior desse espaço (aproximadamente 30 cm);

Sistema de segurança: O tubo de PVC deve sobressair 20 a 30 cm da superfície e ser fechado com uma tampa de PVC (removível), fixado por um pino de aço com cadeado (Figura 4.7)

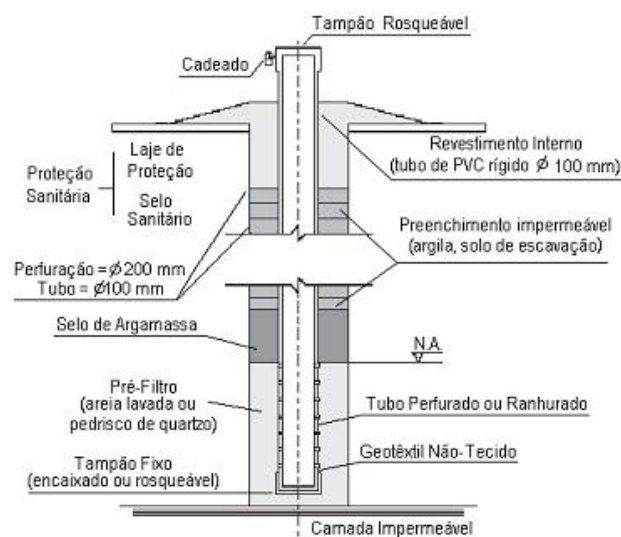


Figura 4.5 Esquemático do piezômetro

Nível d'água: Foram confeccionados em tubos de PVC série R com diâmetro de 75 mm, e instalados nos respectivos furos de sondagens a trado, em conformidade com os procedimentos descritos a seguir (Figura 4.8):

Pré-Filtro: É a areia lavada (calibrada) com granulometria superior a malha do filtro, aplicada no preenchimento de todo o espaço anular (zona saturada e não saturada) entre o filtro e a parede da perfuração;

Filtro: É o tubo de PVC que é perfurado e envolto por uma tela de nylon de malha inferior a granulometria da areia lavada utilizada no pré-filtro (Figura 4.6);

Sistema de segurança: O tubo de PVC deve sobressair 20 a 30 cm da superfície e ser fechado com uma tampa de PVC (removível), fixado por um pino de aço com cadeado (Figura 4.7).



Figura 4.6 Filtro NAs e PZs



Figura 4.7 Sistema de segurança

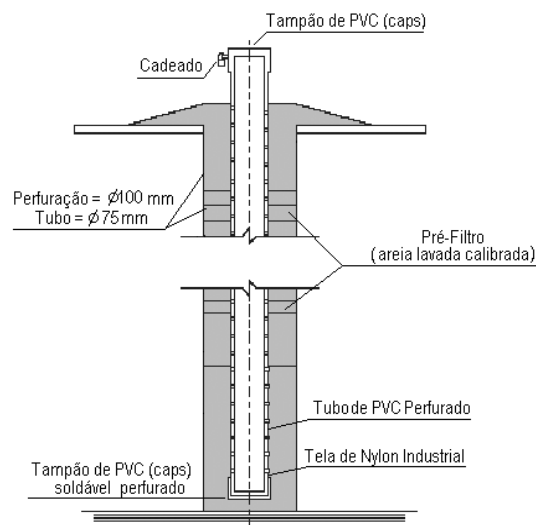


Figura 4.8 Esquemático do Nível D'água

Limnómetro: Foram confeccionados em perfis de alumínio, e instalados nos respectivos pontos de monitoramento, em conformidade com os procedimentos descritos a seguir:

Graduação: Foi pintada com tinta óleo, e identificada em centímetros (Figura 4.9);

Fixação: Foi executada com pinos de aço em estrutura de concreto (Figura 4.10).



Figura 4.9 Esquemático do limnómetro



Figura 4.10 Limnómetro instalado

4.1.4 Levantamento Planialtimétrico

O objetivo desta atividade de campo, foi identificar planialtimetricamente a instrumentação na área de estudo, e definir o plano de referência (PR) para o monitoramento. Os levantamentos realizados estão referenciados a Estação Geodésica do Morro Alto do IBGE, de cota altimétrica 50800 mm e coordenadas UTM (N:7.597.512,716 e L:263.969,778).

Levantamento Planimétrico: Foi utilizado um equipamento de georeferenciamento por satélite (GPS) “Geo Explore 3” da marca TOPCON, para identificar em coordenadas UTM, planimetricamente a instrumentação na área de estudo.

Levantamento Altimétrico: Foi utilizado um nível automático da marca BERGUER, para identificar através do método geométrico as cotas altimétricas da instrumentação na área de estudo, as quais estão referenciadas a um RN auxiliar de cota 13229 mm transportado do marco do IBGE, para dentro do CIEP 332 (Figuras 4.11 e 4.12).



Figura 4.11 Transportando RN auxiliar



Figura 4.12 Levantamento altimétrico

4.1.5 Monitoramento das Cargas Hidráulicas

Este monitoramento foi realizado no período de dezembro de 2005 a março de 2006 e teve como objetivo a obtenção das cargas hidráulicas a montante e a jusante da ADRSU, para análise da dinâmica de fluxo.

Águas Subterrâneas: o monitoramento realizou-se por meio de leituras das cargas piezométricas e dos níveis d'água a montante (PZ106, PZ108 e NA03) e a jusante, no brejo (PZ101, PZ102 e NA01) e no córrego (PZ103, PZ104 e NA02), utilizado-se para tal, um equipamento de sonda sonora (Figuras 4.13 e 4.14).



Figura 4.13 Esquemático da sonda



Figura 4.14 Monitoramento da dinâmica

Águas Superficiais: O monitoramento realizou-se por meio de leitura dos limnímetros a montante (LN01) e a jusante (LN02).

4.1.6 Ensaio de Permeabilidade *In Situ*

Nos dias atuais existem diversas metodologias para se determinar o coeficiente de permeabilidade seja em laboratório ou in situ. Muitos trabalhos (OLSON E DANIEL, 1981, DEGROOT & LUTENEGGER, 1993 & BENSON et al.,1997) discutem as metodologias comparando-as, apresentando as vantagens e desvantagens de cada uma delas.

Permeâmetro de Carga Variável : Foram realizados ensaios de rebaixamento, nos PZ101, PZ102, PZ103, PZ104, PZ106, PZ108, PZ109, PZ110 e PZ111, para a determinação do coeficiente da permeabilidade (k) in situ dos solos nas respectivas profundidades, empregando um permeâmetro de carga variável confeccionado em PVC, que foi adaptado à parte superior dos piezômetros por meio de uma luva de PVC com anel de vedação, de mesmo diâmetro (Figura 4.15 e 4.16).

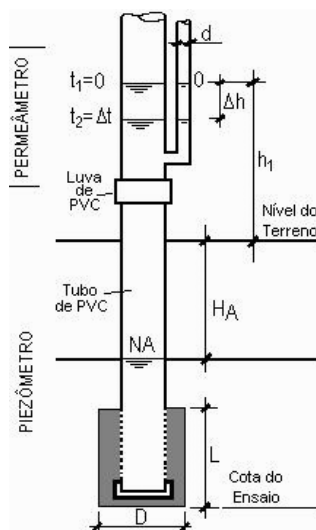


Figura 4.15 Esquemático do ensaio



Figura 4.16 Ensaio de permeabilidade in situ

Os cálculos para a determinação do coeficiente de permeabilidade (k) seguiram a proposta de Hvorslev (1949).

$$k = \frac{d^2 \ln\left(\frac{2L}{D}\right)}{8L(t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2} \quad (1)$$

onde:

D=diâmetro interno da amostra, em centímetros;

d=diâmetro interno do tubo em que a variação de carga é medida, em centímetros;

H_1 =carga piezométrica quando $t=t_1$, em centímetros;

H_2 =carga piezométrica quando $t=t_2$, em centímetros;

L =comprimento interno da amostra, em centímetros e

t_2-t_1 =intervalo de tempo, em segundos.

Permeômetro de Carga Constante: Foram executados ensaios de furo, ao lado dos PZ101, PZ102, PZ103, PZ104, PZ106 e PZ108 para a determinação do coeficiente de permeabilidade (k) in situ dos solos na profundidade de 40 cm, empregando um permeômetro de Guelph, que é composto de uma garrafa de Mariotte (que controla a carga constante de água dentro do furo), um tubo de acrílico com régua graduada e um tripé (Figuras 4.17 e 4.18).

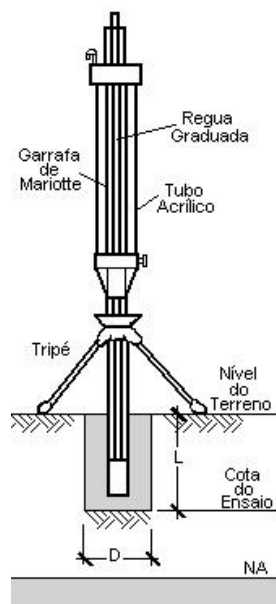


Figura 4.17 Esquemático do Guelph



Figura 4.18 Ensaio de Guelph

Os cálculos para a determinação do coeficiente de permeabilidade (k) seguiram a metodologia proposta no manual do equipamento.

4.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

4.2.1 Ensaio de Caracterização Física do Solo

Foram realizados ensaios de caracterização completa, nas vinte e seis amostras de solo em conformidade com as metodologias propostas pela ABNT.

Análise Granulométrica: Realizado em conformidade com a ABNT/NBR 7181 (1984).

Limites de Liquidez: Realizado em conformidade com a ABNT/NBR 6459 (1984).

Limite de Plasticidade: Realizado em conformidade com a ABNT/NBR 7180 (1984).

Massa Específica dos Grãos: Realizado em conformidade com a ABNT/NBR 6508 (1982)

Umidade Natural: Realizado em conformidade com a ABNT/NBR 6457 (1984).

4.2.2 Ensaio de Caracterização Química do Solo

Foram realizadas análises químicas nas dezesseis amostras de solo coletadas referentes a três furos de sondagens em conformidade com as metodologias propostas pelo Centro Nacional de Pesquisa do Solo.

CTC: Realizado em conformidade com a EMBRAPA (1997).

pH: Realizado em conformidade com a EMBRAPA (1997).

MO: Realizado em conformidade com a EMBRAPA (1997).

Metais Pesados (Cu e Zn): Realizado em conformidade com a EMBRAPA (1997).

4.2.3 Ensaio de Difração por Raios-X

Foram realizados ensaios de identificação química da fração argila do solo por meio da difração por raios X (EDX) nas dezesseis amostras de solo coletadas

referentes a três furos de sondagens (PZ109, PZ110 e PZ111), com o objetivo de conhecer os constituintes químicos do solo.

4.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Foram utilizados os aplicativos SEEP/W e CTRAN/W, ambos da GEO-SLOPE International. Os dois aplicativos utilizam o método dos elementos finitos para a resolução das equações diferenciais que governam o problema. O segundo aplicativo importa os dados gerados pelo primeiro e utiliza o método dos elementos finitos para integração, no tempo, do problema do transporte de contaminantes.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO

Os resultados apresentados a seguir são referentes às amostras de solo, coletadas nos furos de sondagem dos PZ109, PZ110, PZ111, NA01, NA02 e NA03, bem como levantamentos e monitoramentos realizados na área de estudo.

5.1.1 Caracterização Tátil-Visual

Na Tabela 5.1 são apresentados os resultados da caracterização tátil-visual.

Tabela 5.1 Resultados da caracterização tátil-visual do solo

FURO	AMOSTRA	PROF. (m)	CLASSIFICAÇÃO
PZ109		0,00 a 0,10	Detritos vegetais
	AM 01	0,10 a 1,00	Solo argilo arenoso cor marrom acinzentado
	AM 02	1,00 a 3,10	Solo argilo arenoso cor variegada
	AM 03	3,10 a 3,70	Solo areno argiloso cor cinza claro
	AM 04	3,70 a 4,10	Solo argilo arenoso cor cinza claro
	AM 05	4,10 a 5,10	Solo argilo siltoso cor variegada
PZ110		0,00 a 0,20	Detritos vegetais
	AM 01	0,20 a 0,85	Solo areno argiloso cor marrom escuro
	AM 02	0,85 a 1,50	Solo argilo arenoso cor marrom amarelado
	AM 03	1,50 a 2,20	Pedregulhos lateríticos cor vermelha
	AM 04	2,20 a 4,30	Solo areno argiloso cor cinza claro
	AM 05	4,30 a 5,30	Solo argilo arenoso cor variegada
PZ111		0,00 a 0,10	Detritos vegetais
	AM 01	0,10 a 0,50	Solo argilo arenoso c/ raízes cor marrom escuro
	AM 02	0,50 a 1,20	Solo argilo arenoso cor marrom
	AM 03	1,20 a 1,80	Solo argilo arenoso c/ pedregulhos cor marrom amarelado
	AM 04	1,80 a 2,30	Fragmentos lateríticos c/ argila arenosa cor vermelha
	AM 05	2,30 a 3,10	Solo arenoso muito argiloso c/ pedregulhos cor variegada
	AM 06	3,10 a 4,90	Solo areno argiloso c/ pedregulhos cor variegada
NA01	AM 01	0,00 a 0,40	Solo turfáceo cor preta
	AM 02	0,40 a 1,90	Solo areno argiloso cor cinza
	AM 03	1,90 a 2,30	Solo areno argiloso cor cinza claro
NA02	AM 01	0,00 a 0,40	Solo turfáceo cor preta
	AM 02	0,40 a 1,30	Solo areno argiloso cor cinza
	AM 03	1,30 a 1,70	Solo areno argiloso cor cinza claro
	AM 04	1,70 a 2,30	Solo argilo siltoso cor variegada
NA03		0,00 a 0,10	Detritos vegetais
	AM 01	0,10 a 1,10	Solo argilo arenoso cor marrom
	AM 02	1,10 a 1,70	Solo argilo arenoso cor variegada
	AM 03	1,70 a 2,20	Solo argilo siltoso cor variegada

5.1.2 Análise Granulométrica

Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados dos ensaios de análise granulométrica, realizados no Laboratório de Engenharia Civil – LECIV da UENF.

Tabela 5.2 Resultados da análise granulométrica

FURO	AMOSTRA	FRAÇÃO (%)								CLASSIFICAÇÃO
		ARGILA	SILTE	AREIA			PEDREGULHO			
				fina	média	grossa	fina	média	grossa	
PZ109	AM 01	34	9	16	28	13	0	0	0	Areia argilosa
	AM 02	31	7	17	31	14	0	0	0	Areia argilosa
	AM 03	31	9	14	26	20	0	0	0	Areia argilosa
	AM 04	52	12	10	16	10	0	0	0	Argila arenosa
	AM 05	52	13	13	15	7	0	0	0	Argila arenosa
PZ110	AM 01	23	10	22	34	11	0	0	0	Areia argilosa
	AM 02	39	10	16	24	11	0	0	0	Areia argilosa
	AM 03	17	6	10	14	9	9	29	9	Pedregulho
	AM 04	28	11	14	32	15	0	0	0	Areia argilosa
	AM 05	60	9	7	15	9	0	0	0	Argila arenosa
PZ111	AM 01	23	9	16	38	13	1	0	0	Areia argilosa
	AM 02	34	10	15	30	10	1	0	0	Areia argilosa
	AM 03	38	9	13	23	12	2	3	0	Areia argilosa
	AM 04	20	4	8	15	12	16	25	0	Pedregulho
	AM 05	30	7	10	22	21	9	1	0	Areia argilosa
	AM 06	27	6	7	26	27	7	0	0	Areia argilosa
NA01	AM 01	46	34	7	9	3	1	0	0	Argila silto-arenosa
	AM 02	26	5	21	36	12	0	0	0	Areia argilosa
	AM 03	23	10	20	35	12	0	0	0	Areia argilosa
NA02	AM 01	47	22	8	16	7	0	0	0	Argila areno-siltosa
	AM 02	19	8	18	40	15	0	0	0	Areia argilosa
	AM 03	38	11	17	25	9	0	0	0	Areia argilosa
	AM 04	53	6	15	18	8	0	0	0	Argila arenosa
NA03	AM 01	45	7	20	20	8	0	0	0	Areia argilosa
	AM 02	57	6	11	13	5	7	1	0	Argila arenosa
	AM 03	52	7	14	19	8	0	0	0	Argila arenosa

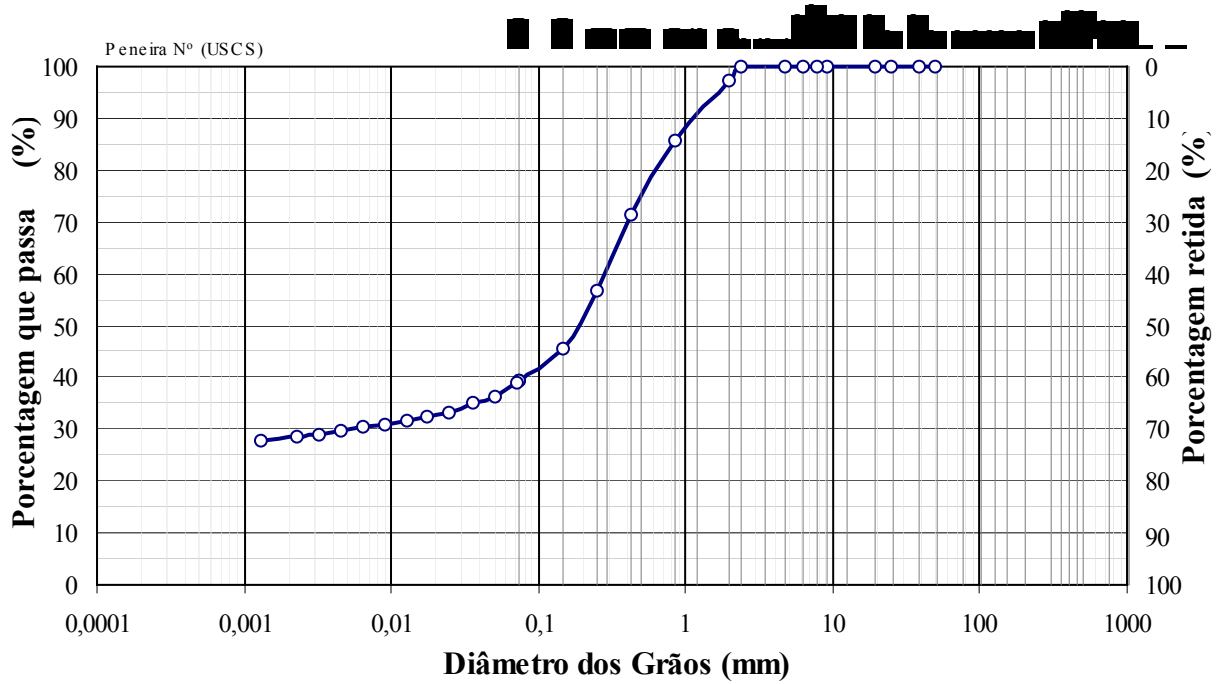


Gráfico 5.3 Curva granulométrica da amostra PZ 109 - AM 03

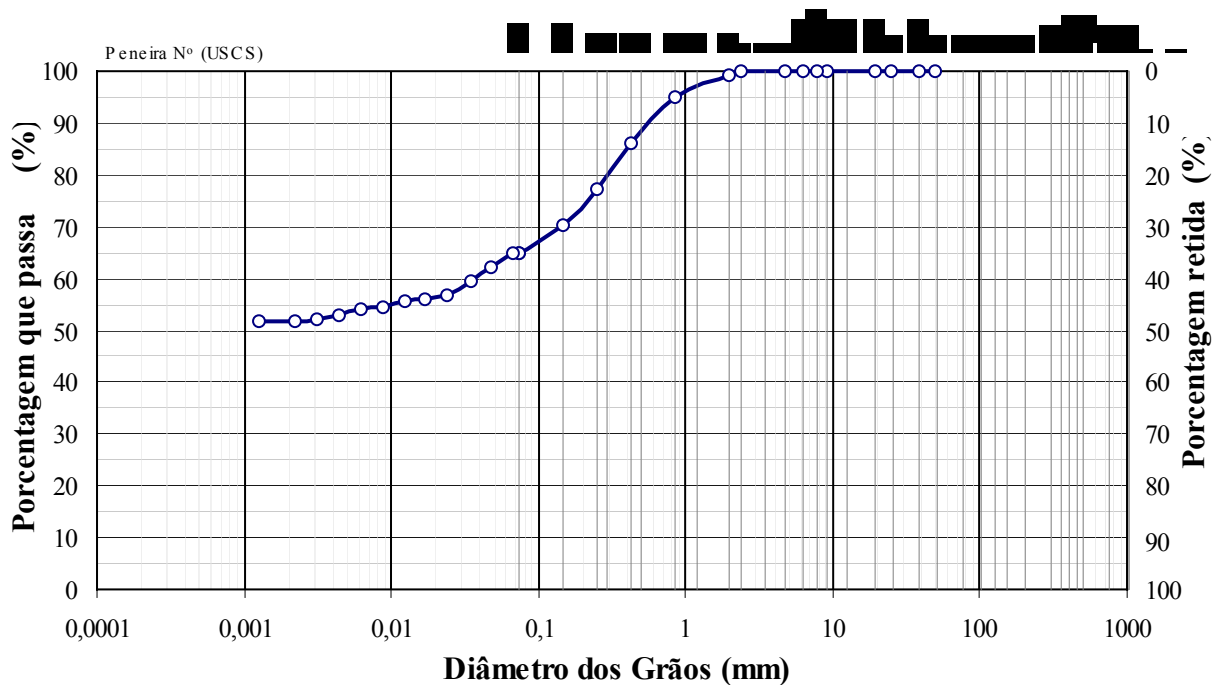


Gráfico 5.4 Curva granulométrica da amostra PZ 109 - AM 04

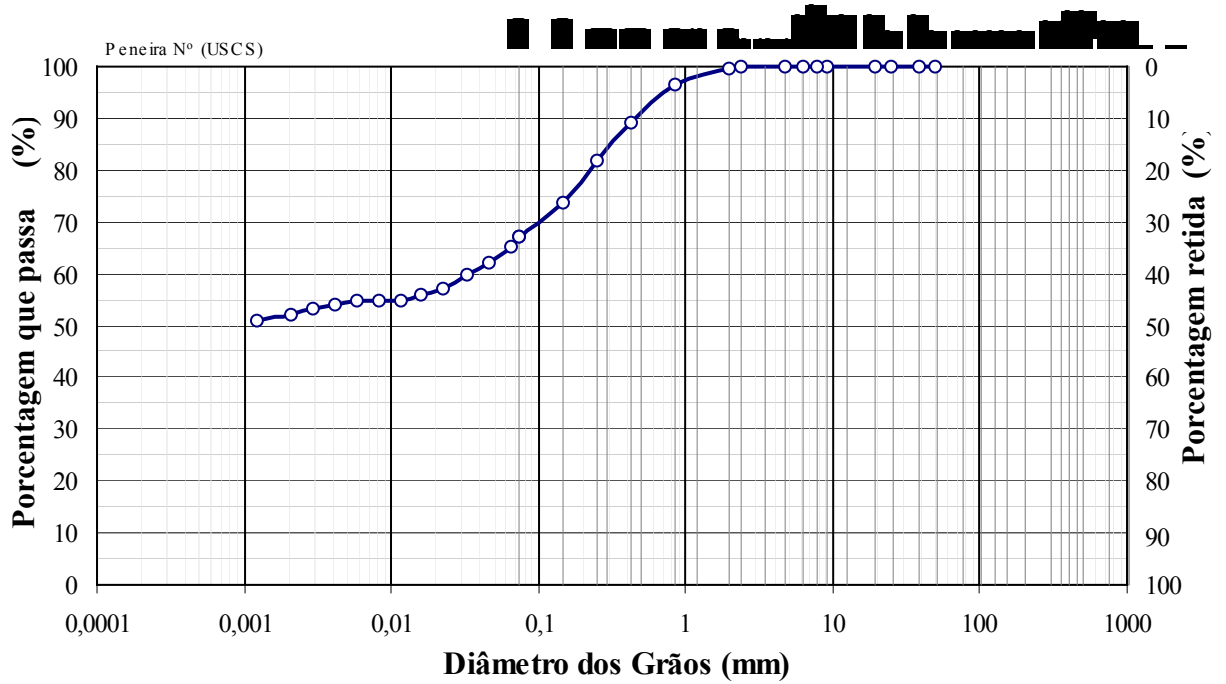


Gráfico 5.5 Curva granulométrica da amostra PZ 109 - AM 05

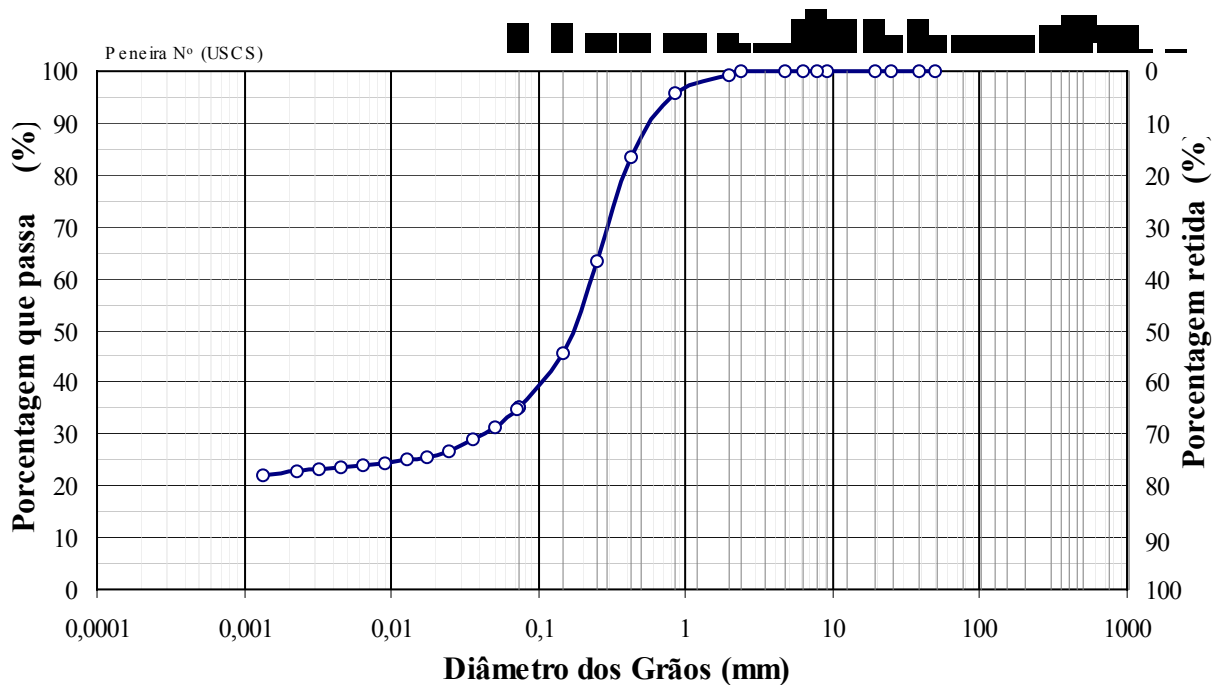


Gráfico 5.6 Curva granulométrica da amostra PZ 110 - AM 01

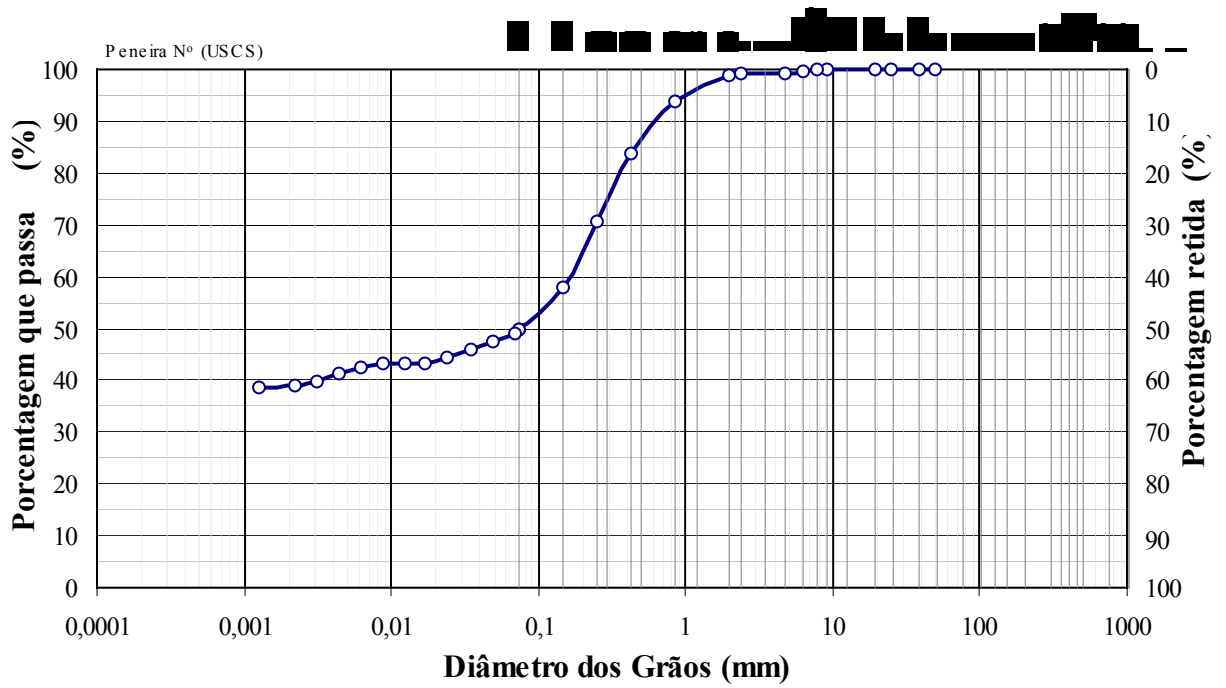


Gráfico 5.7 Curva granulométrica da amostra PZ 110 - AM 02

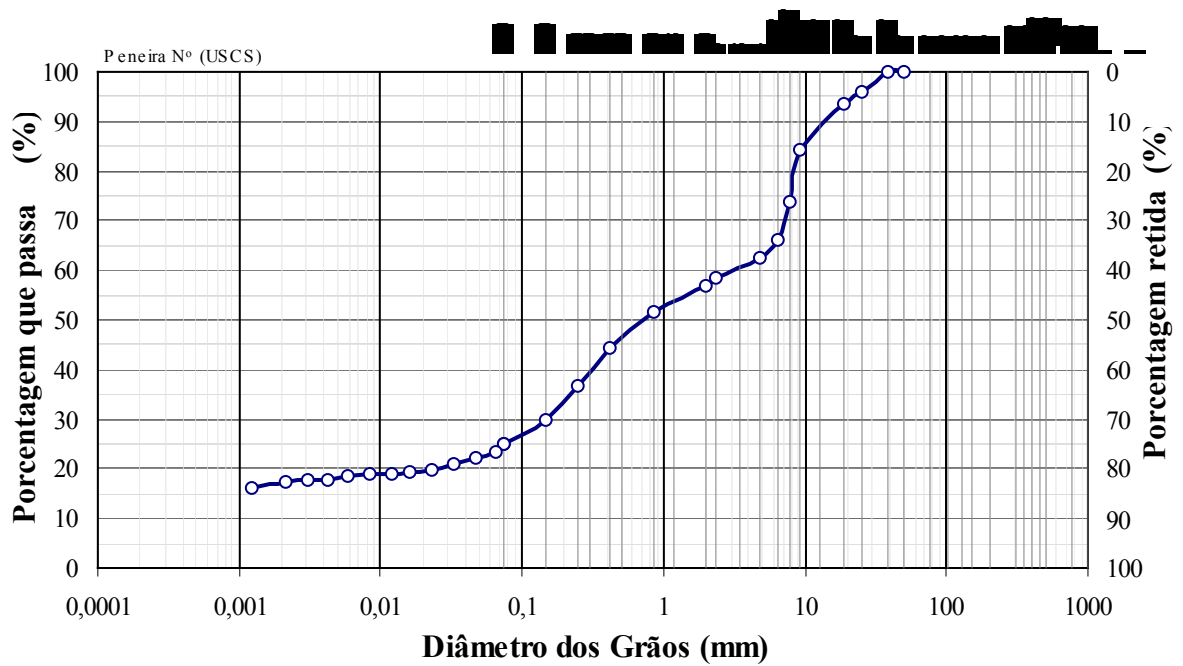


Gráfico 5.8 Curva granulométrica da amostra PZ 110 - AM 03

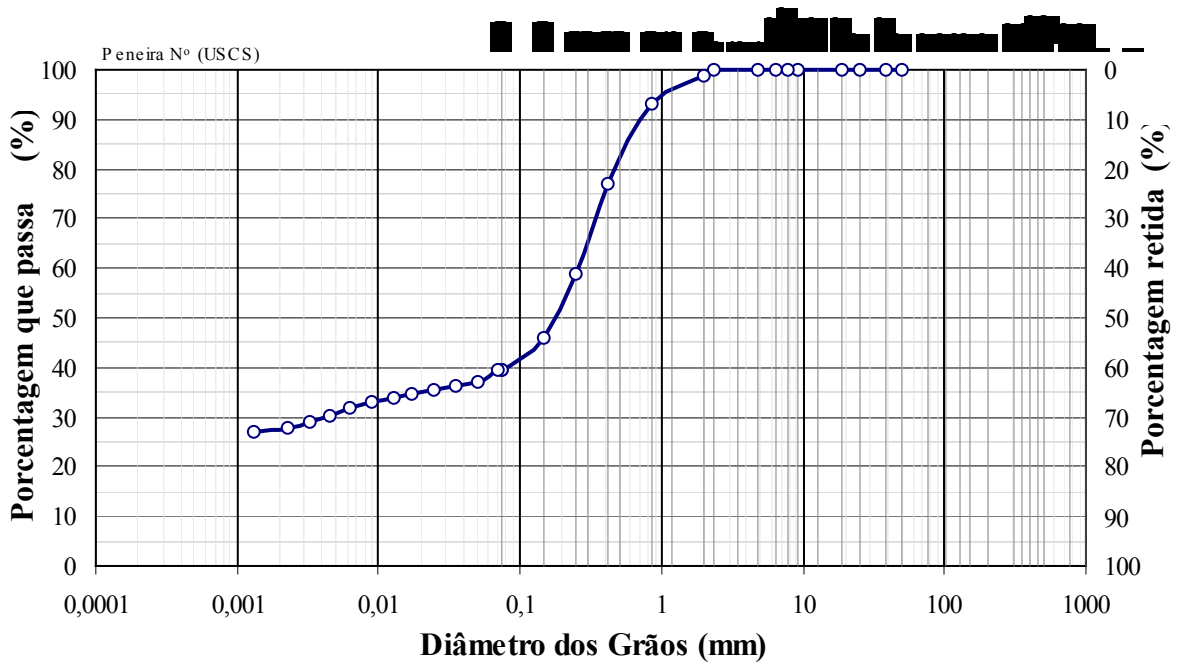


Gráfico 5.9 Curva granulométrica da amostra PZ 110 - AM 04

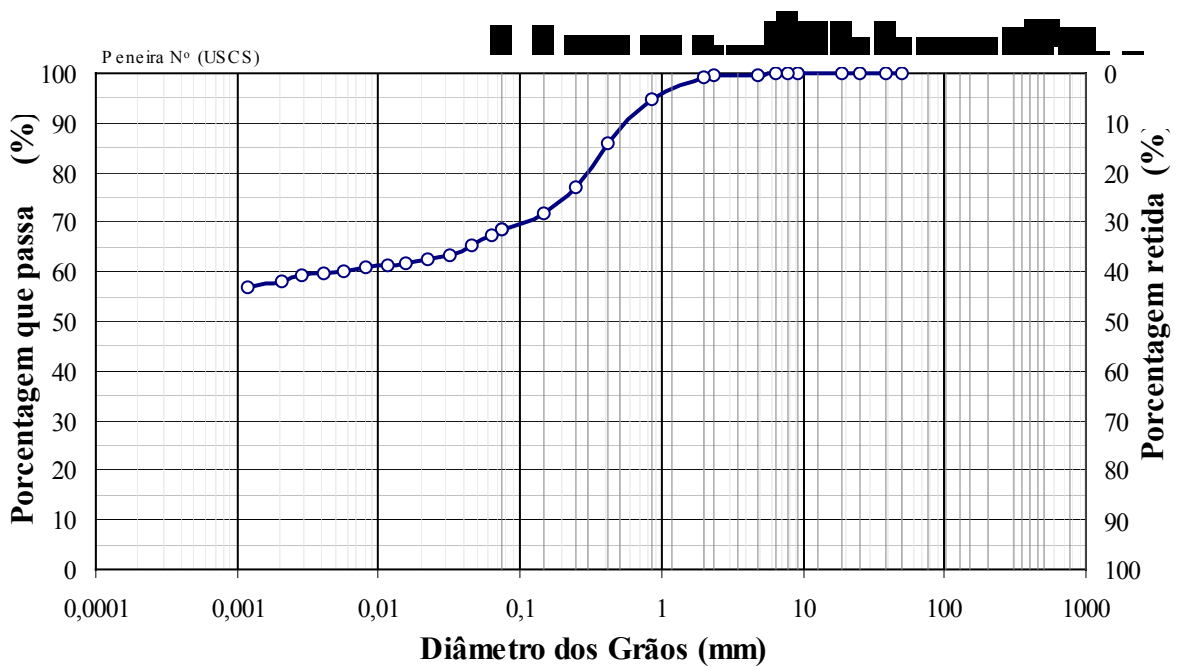


Gráfico 5.10 Curva granulométrica da amostra PZ 110 - AM 05

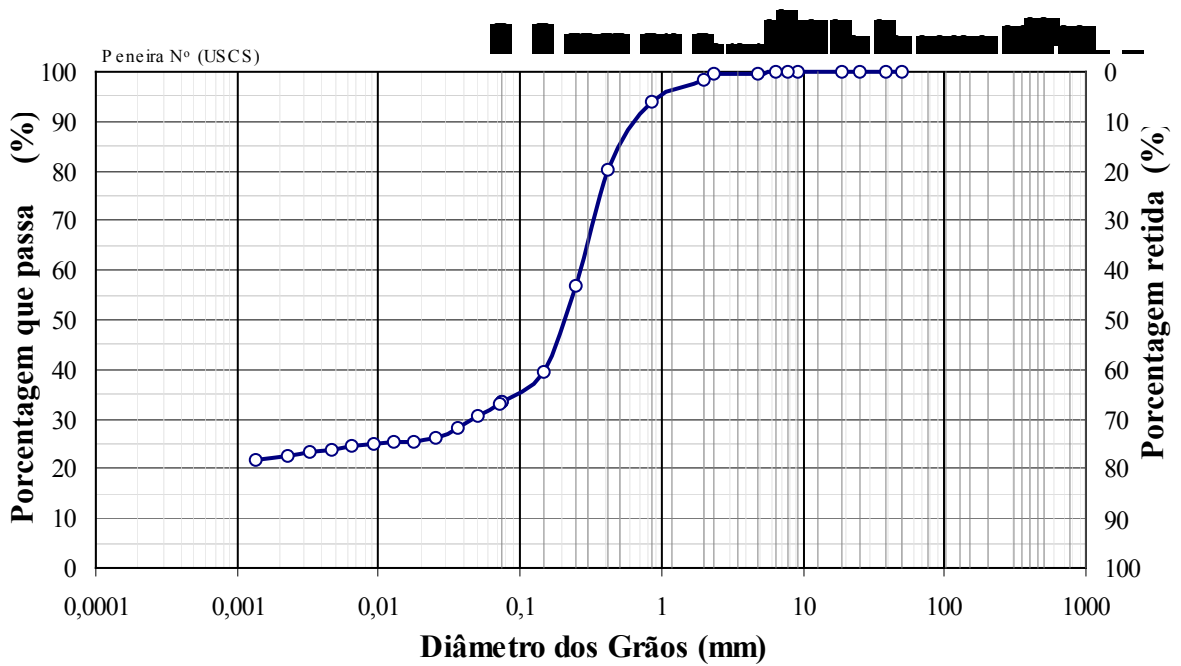


Gráfico 5.11 Curva granulométrica da amostra PZ 111 - AM 01

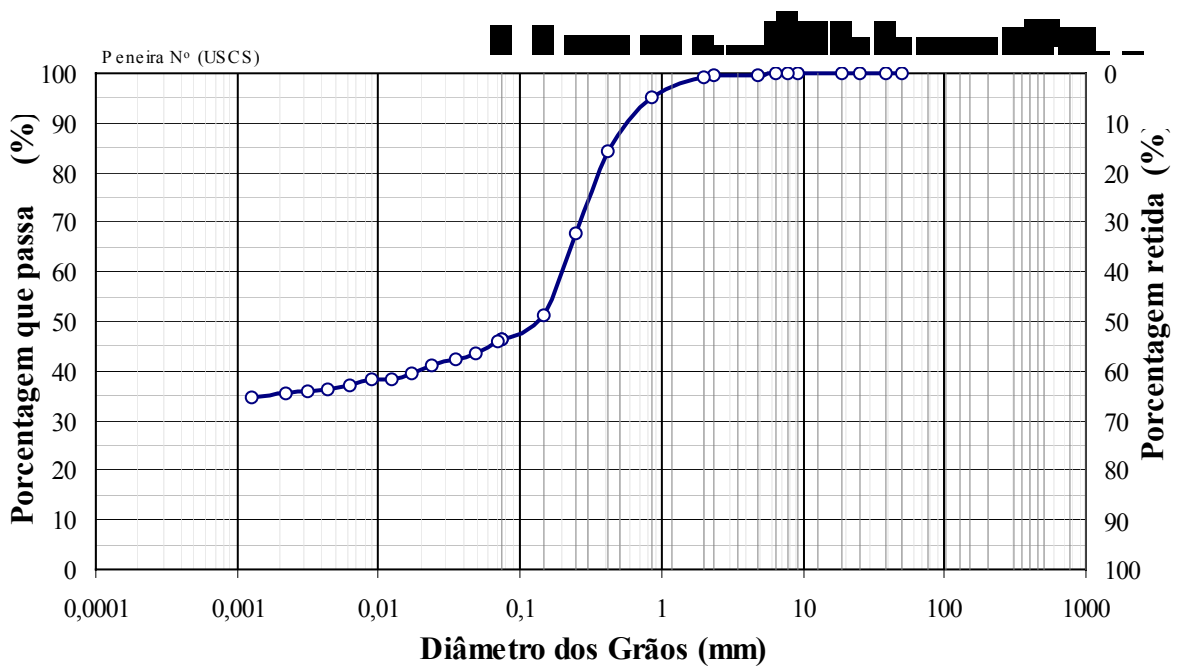


Gráfico 5.12 Curva granulométrica da amostra PZ 111 - AM 02

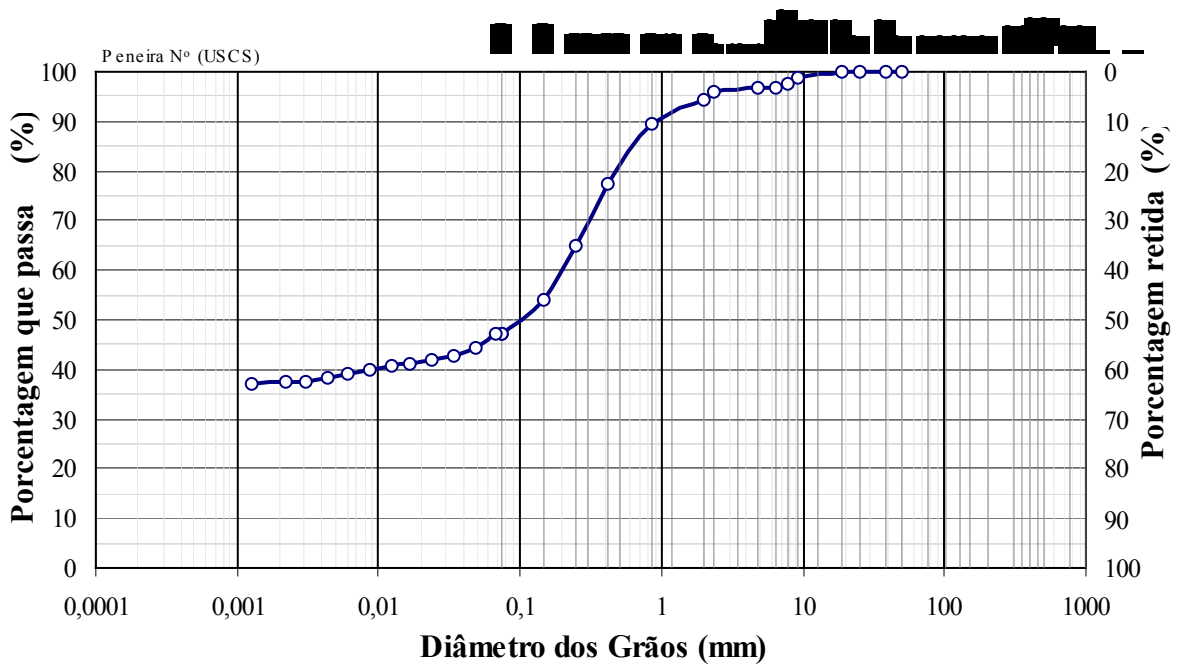


Gráfico 5.13 Curva granulométrica da amostra PZ 111 - AM 03

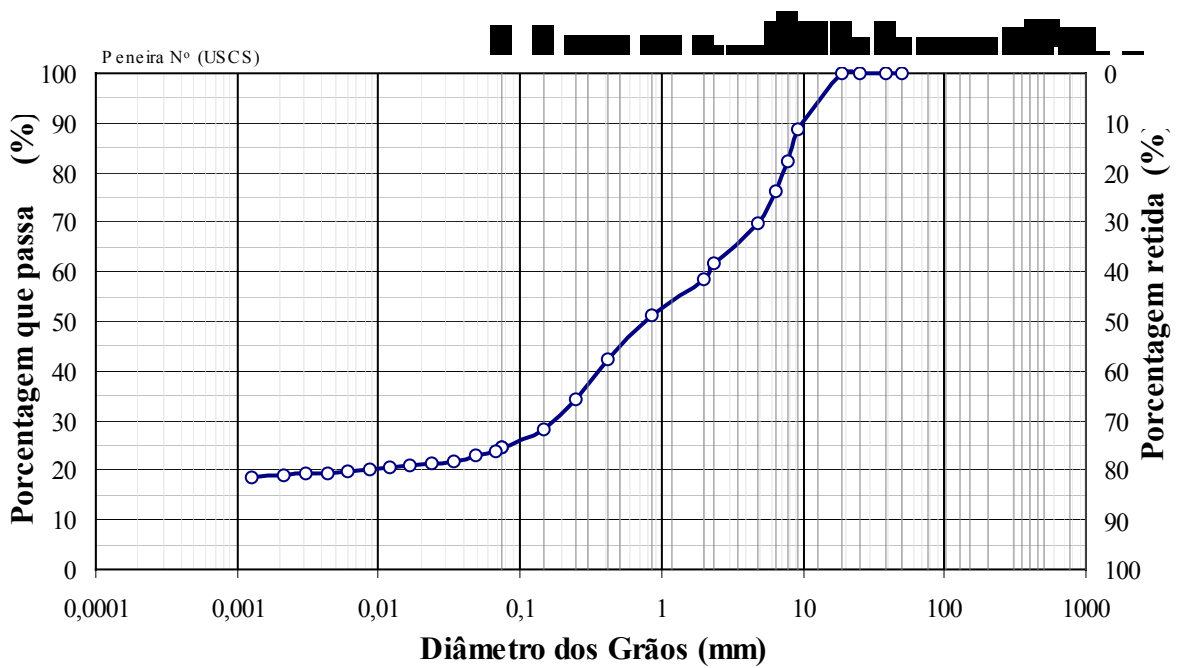


Gráfico 5.14 Curva granulométrica da amostra PZ 111 - AM 04

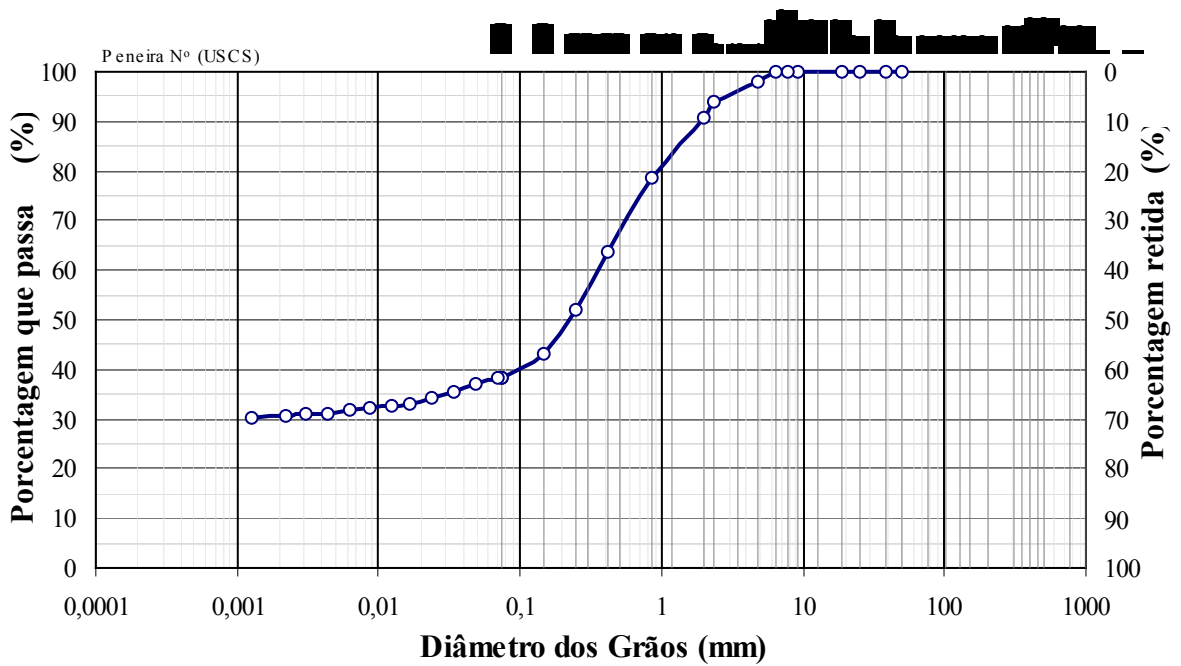


Gráfico 5.15 Curva granulométrica da amostra PZ 111 - AM 05

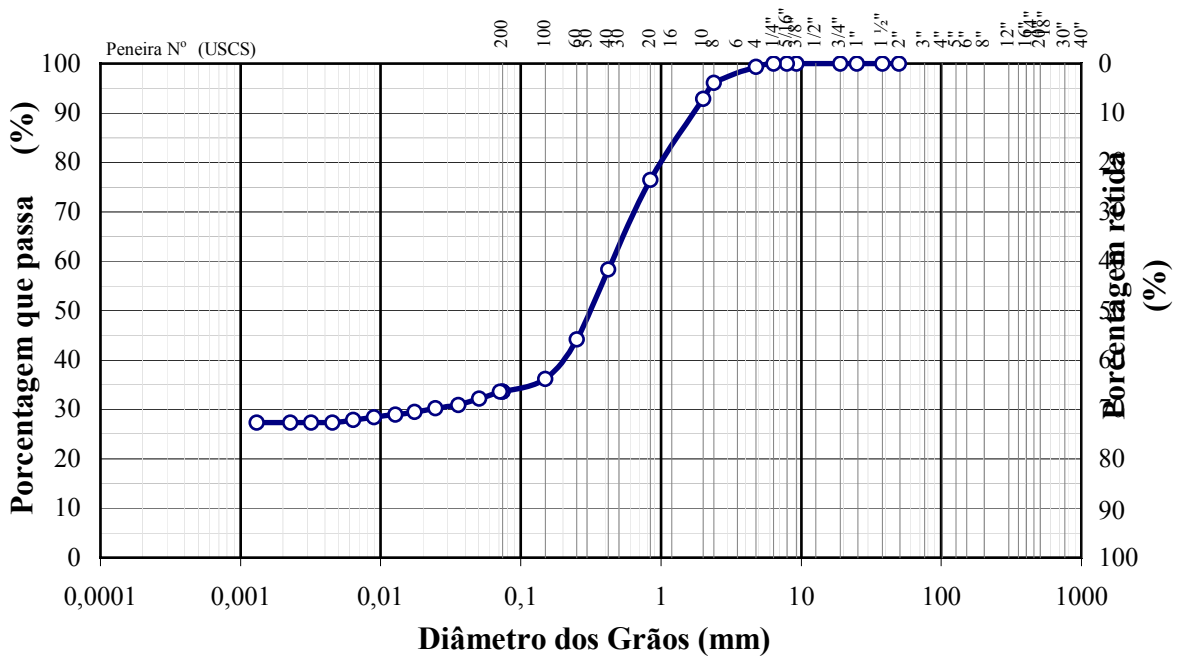


Gráfico 5.16 Curva granulométrica da amostra PZ 111 - AM 06

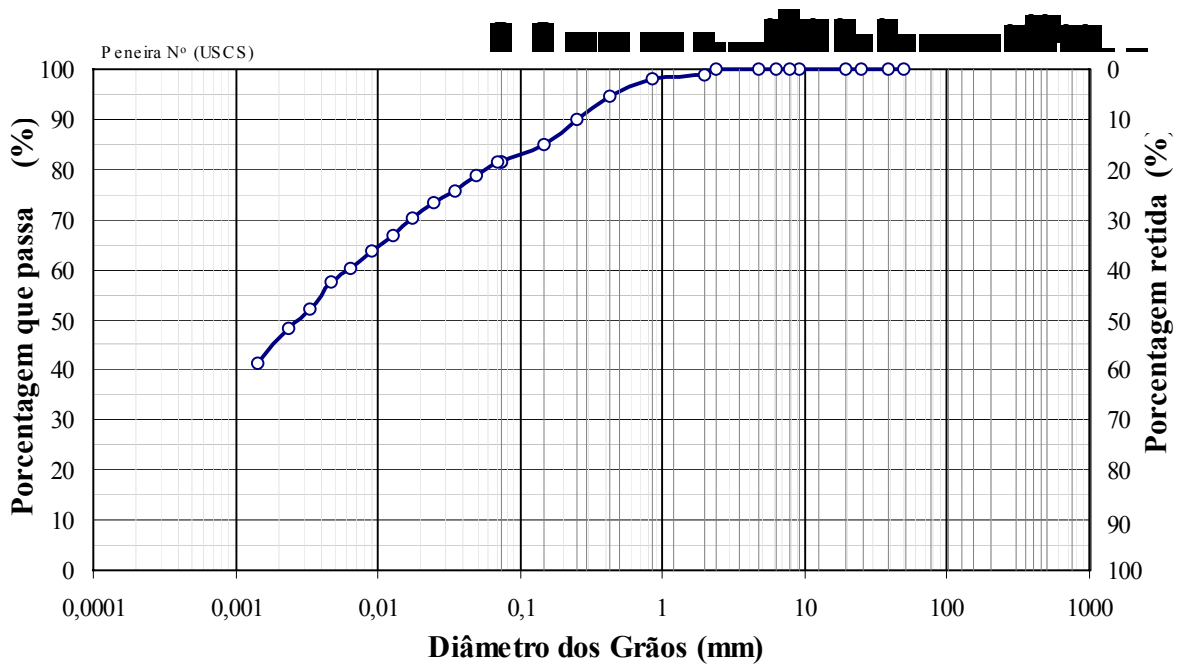


Gráfico 5.17 Curva granulométrica da amostra NA 01 – AM 01

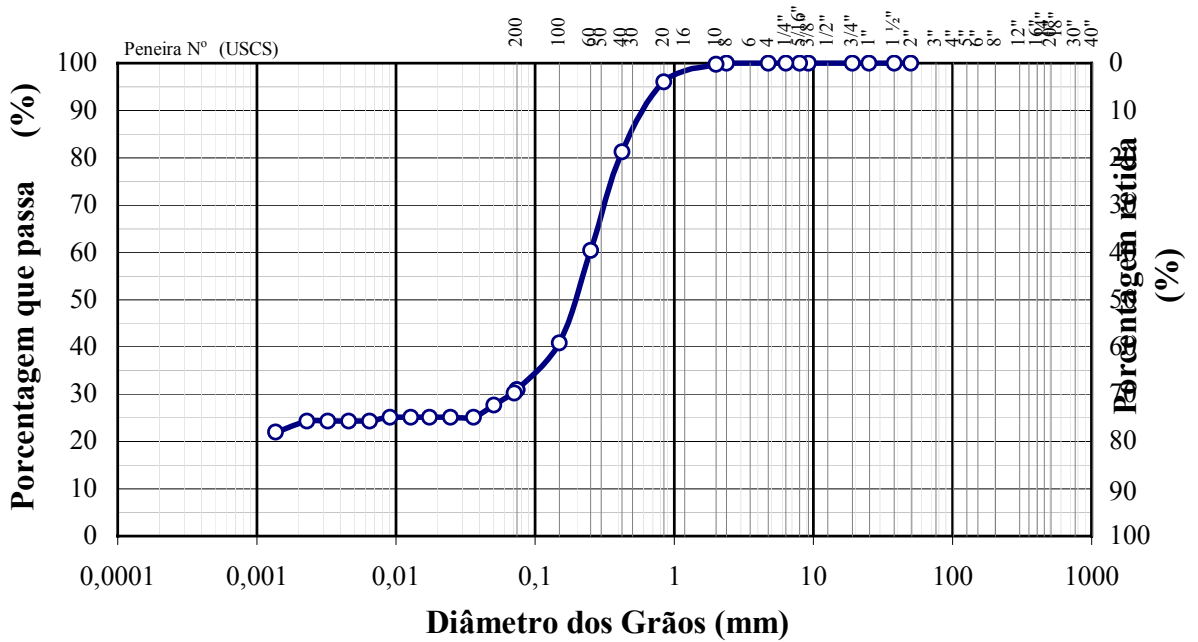


Gráfico 5.18 Curva granulométrica da amostra NA01 - AM 02

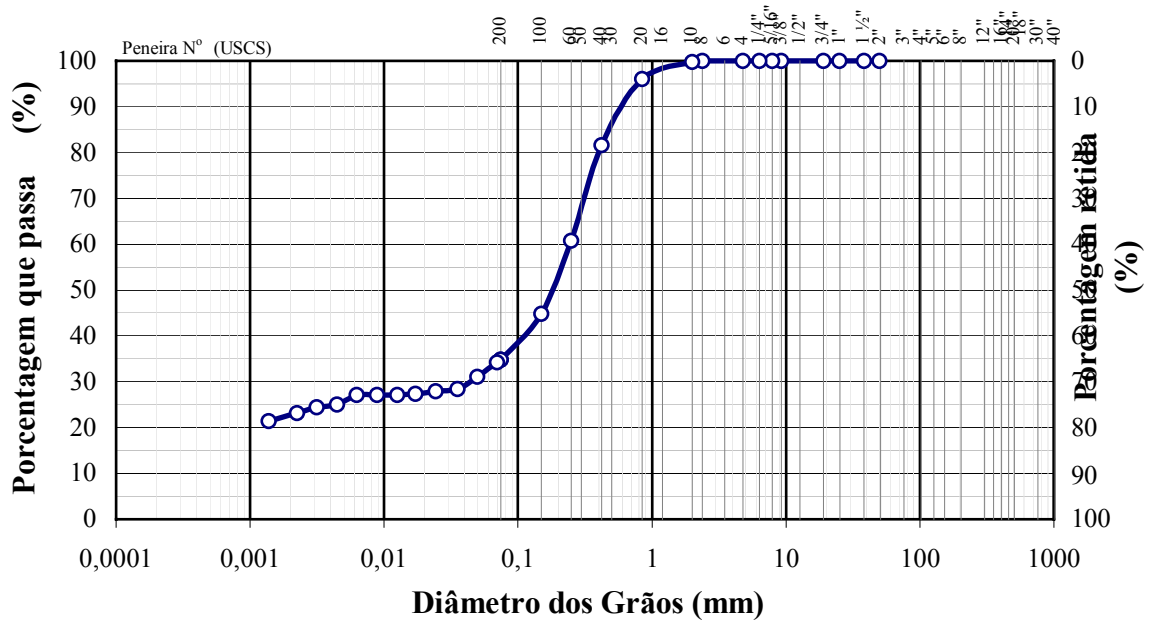


Gráfico 5.19 Curva granulométrica da amostra NA 01 – AM 03

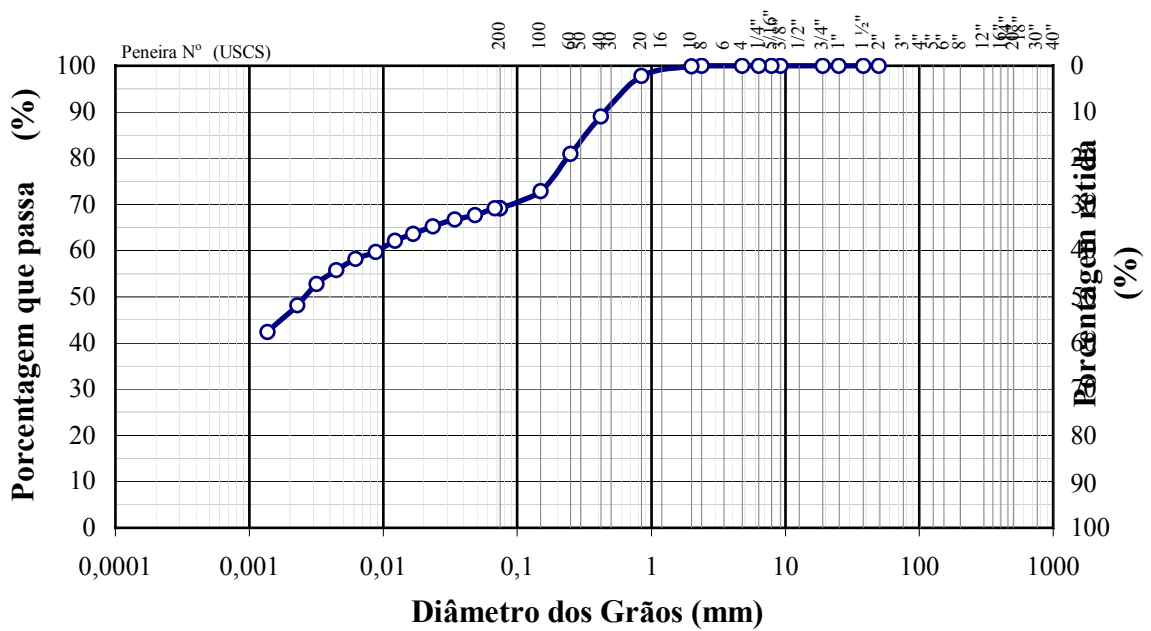


Gráfico 5.20 Curva granulométrica da amostra NA 02 – AM 01

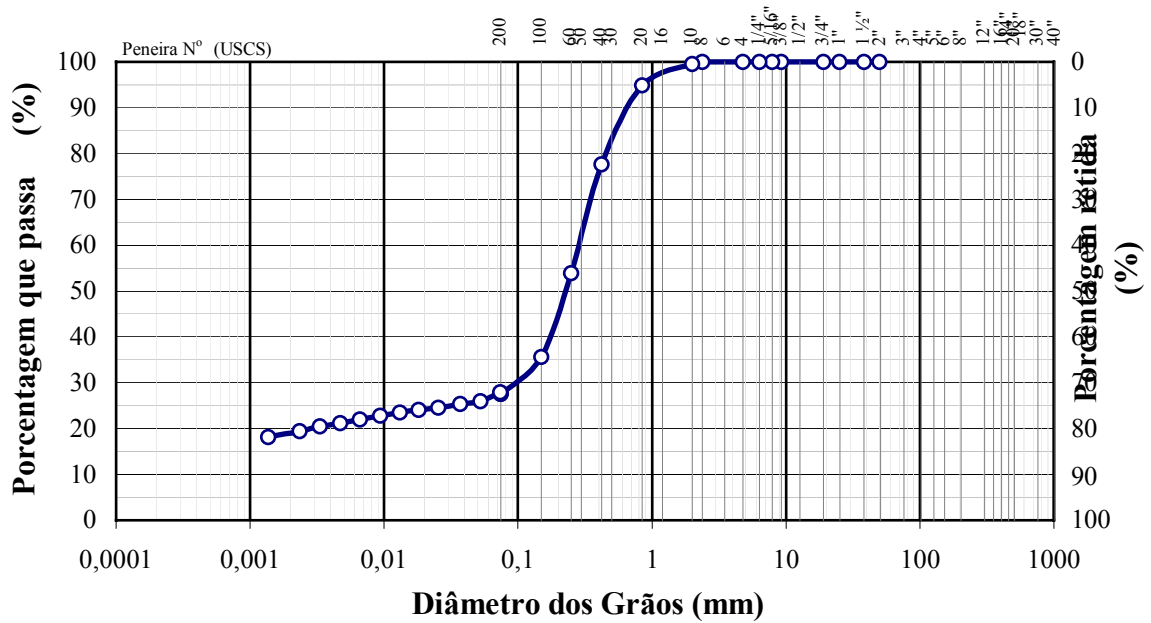


Gráfico 5.21 Curva granulométrica da amostra NA 02 – AM 02

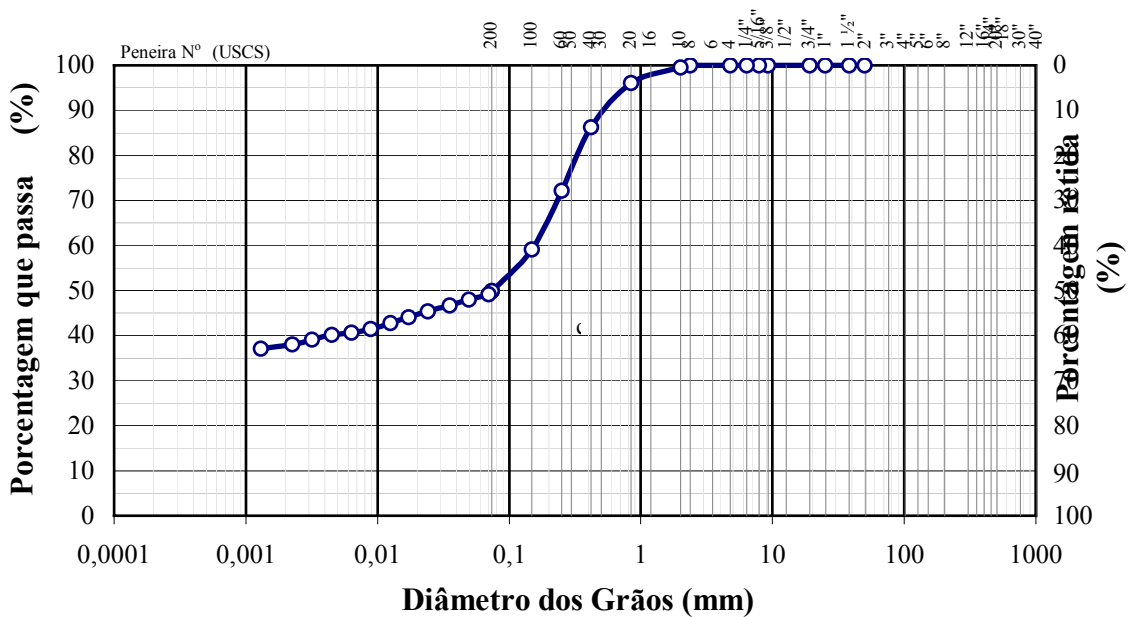


Gráfico 5.22 Curva granulométrica da amostra NA 02 – AM 03

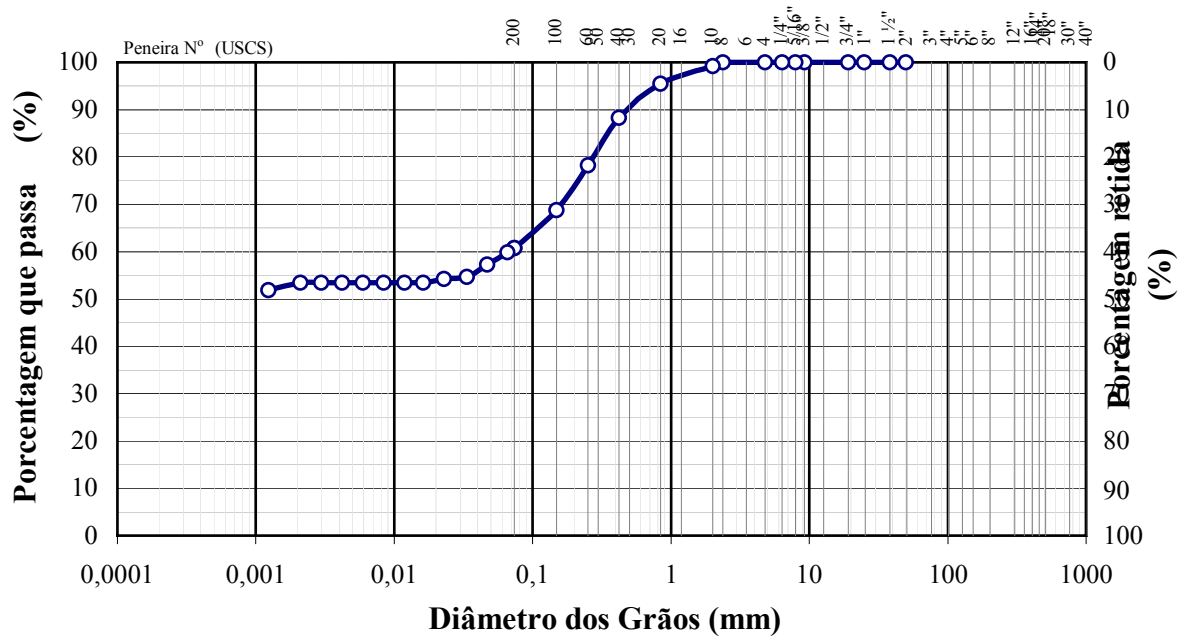


Gráfico 5.23 Curva granulométrica da amostra NA 02 – AM 03

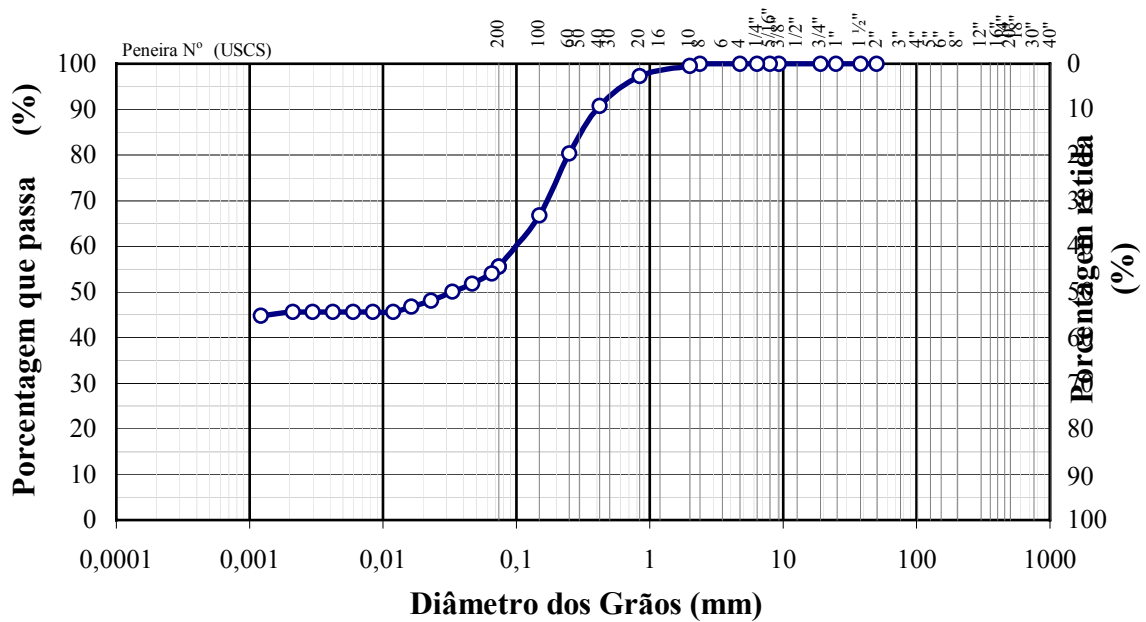


Gráfico 5.24 Curva granulométrica da amostra NA 03 – AM 01

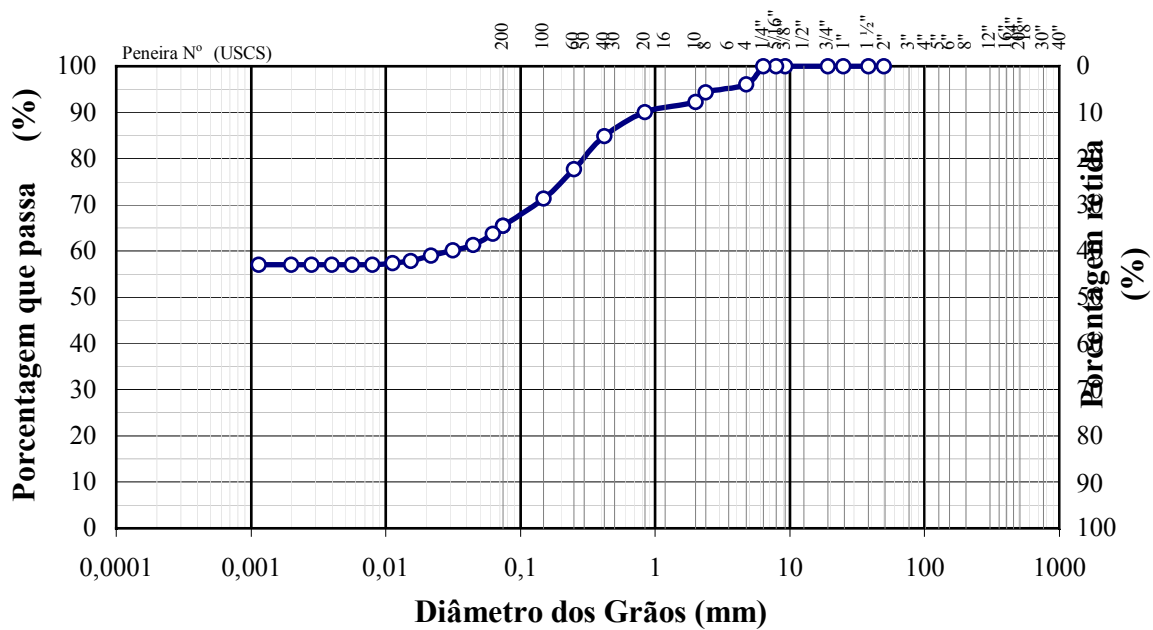


Gráfico 5.25 Curva granulométrica da amostra NA 03 – AM 02

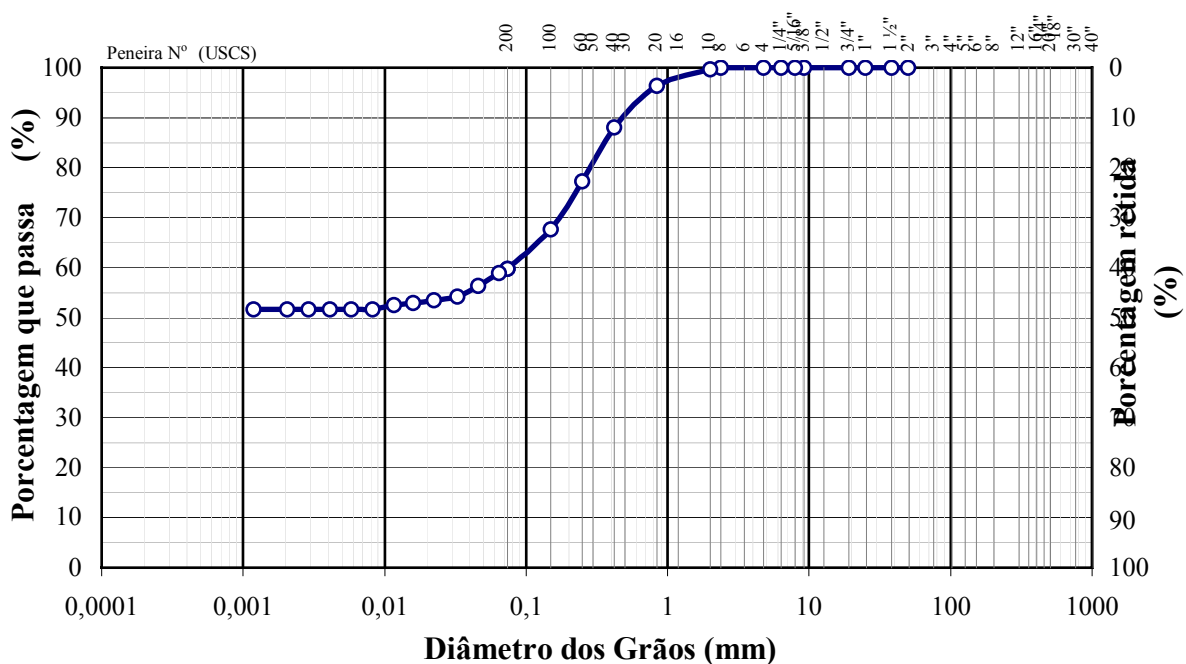


Gráfico 5.26 Curva granulométrica da amostra NA 03 – AM 03

Consideraram-se também alguns dos perfis de sondagem (PZ101, PZ103, PZ104, PZ106 e PZ108) referentes a estudos anteriores (SANTOS JR.,2002 & ALMEIDA et al. 2004) com objetivo de melhor representatividade do meio físico, uma vez que estes se encontravam em pontos intermediários aos realizados neste

trabalho. Com estes dados determinou-se a existência de um quarto tipo de solo, caracterizado por uma mistura de lixo e solo.

Com os resultados obtidos na caracterização tátil-visual e análise granulométrica identificou-se um perfil de solo com aproximadamente 5 m de profundidade, apresentando três camadas bem definidas, onde a primeira é formada por um solo argilo silto-arenoso de cor predominantemente marrom, a segunda por um solo areno argiloso de cor predominantemente cinza e uma terceira por um solo argilo arenoso de cor variegada. Sendo que, em determinado trecho entre os furos PZ110 e PZ111 apresentou-se uma camada de aproximadamente 60 cm de pedregulhos e fragmentos lateríticos de cor vermelha, desconsiderada do perfil por ser descontínua.

5.1.3 Levantamento Planialtimétrico

Na Tabela 5.3 são apresentados os resultados dos levantamentos planimétrico (GPS) e altimétrico (método geométrico) da instrumentação.

Tabela 5.3 Cotas altimétricas e coordenadas UTM da instrumentação

INSTRUMENTAÇÃO	COTAS ALTIMÉTRICAS (mm)	COORDENADAS UTM	
		N	L
PZ101	6352	7596200	264195
PZ102	6542	7596153	264258
PZ103	6158	7596372	264159
PZ104	6048	7596365	264236
PZ106	9279	7596436	263525
PZ108	8509	7596417	263443
PZ109	9301	7596260	263321
PZ110	8201	7596108	263753
PZ111	7737	7596190	263983
NA01	6732	7596190	264228
NA02	6129	7596367	264233
NA03	9679	7596398	263507
LN01	6988	7596285	264134
LN02	5765	7596388	264171

* Cotas altimétricas relativas ao nível do terreno (NT)

Baseado nos dados altimétricos obtidos, observa-se que as cotas sofrem uma variação inferior a 4 m, conferindo a área de estudo um relevo suavemente ondulado, como mostra a Figura 5.1. Estes dados mostram que o fluxo superficial ocorre no sentido oeste-leste.

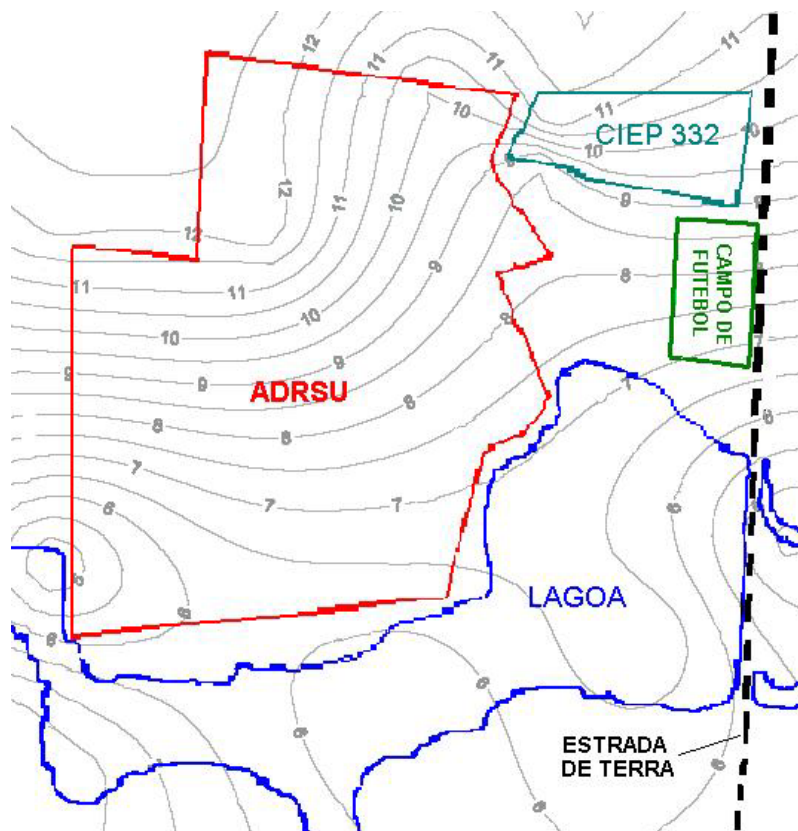


Figura 5.1 Layout das curvas de nível da área de estudo (PROJIR modificado, 1992).

Analisando os dados planimétricos, observa-se que a seção do talvegue possui uma extensão de aproximadamente 1 km. Percebe-se comparando os dados planialtimétricos que a seção sofre um declive de aproximadamente 0,5%.

Considerando os dados da caracterização tátil-visual, da análise granulométrica e levantamento planialtimétrico, traçou-se o perfil estratigráfico da seção do talvegue. A Figura 5.2 mostra esse perfil com a representação da instrumentação instalada.

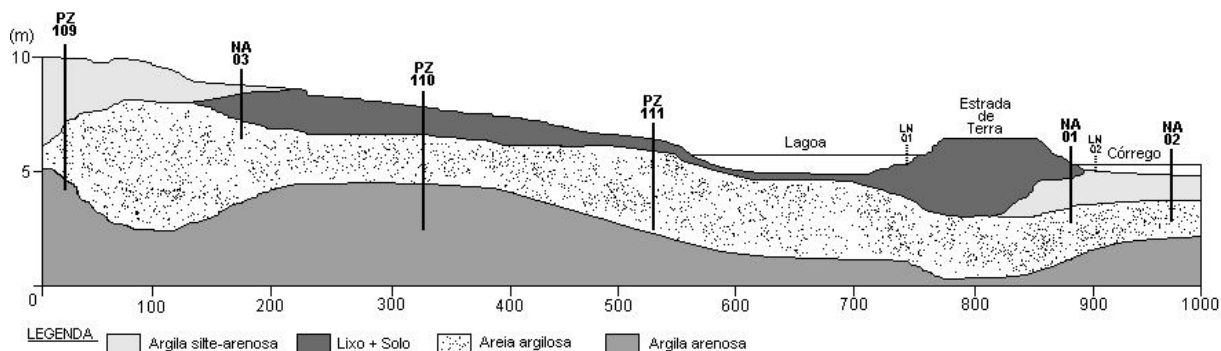


Figura 5.2 Perfil estratigráfico da seção do talvegue, com a representação da instrumentação instalada.

5.1.4 Limites de Atterberg

Na Tabela 5.4 são apresentados os resultados obtidos dos limites de liquidez (LL) e limites de plasticidade (LP), realizados no LECIV da UENF, em conformidade com a NBR 6459 (1984) e NBR 7180 (1984) respectivamente.

5.1.5 Atividade Skempton

Na Tabela 5.4 são apresentados os resultados obtidos da classificação da atividade coloidal das amostras de solo por meio da formulação Skempton (1953).

A argila presente em um solo é considerada normal quando seu índice de atividade coloidal se situa entre 0,75 e 1,25. Quando o índice é menor do que 0,75, considera-se a argila como inativa e, quando o índice é maior que 1,25, como ativa.

5.1.6 Densidade Real dos Grãos

Na Tabela 5.4 são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de determinação da densidade real dos grãos, realizados no LECIV da UENF, em conformidade com a NBR 6508 (1982).

5.1.7 Umidade Natural

Na Tabela 5.4 são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de umidade natural, realizados no LECIV da UENF, em conformidade com a NBR 6457 (1984).

Tabela 5.4 Resultados de índices físicos do solo

FURO	AMOSTRA	LL	LP	IP	ATIVIDADE COLOIDAL (Skempton)		DENSIDADE REAL DOS GRÃOS $\bar{\rho}$ (g/cm ³)	UMIDADE NATURAL ω (%)
		(%)	(%)	(%)	índice	classificação		
PZ 109	AM 01	32,0	17,8	14,2	0,42	inativa	2,83	13,3
	AM 02	36,0	16,6	19,4	0,61	inativa	2,77	17,0
	AM 03	36,8	18,4	18,4	0,65	inativa	2,78	18,7
	AM 04	50,2	24,8	25,4	0,49	inativa	2,83	22,8
	AM 05	60,6	24,9	35,6	0,69	inativa	2,85	28,1
PZ 110	AM 01	24,3	13,8	10,5	0,47	inativa	2,78	12,3
	AM 02	36,4	20,9	15,5	0,40	inativa	2,79	23,1
	AM 03	32,5	17,3	15,1	0,89	normal	2,94	18,0
	AM 04	42,1	21,7	20,4	0,74	inativa	2,73	21,0
	AM 05	76,2	32,2	44,0	0,76	normal	2,81	32,6
PZ 111	AM 01	23,9	15,3	8,6	0,38	inativa	2,79	13,5
	AM 02	34,0	18,3	15,8	0,45	inativa	2,81	22,5
	AM 03	37,6	22,6	14,9	0,40	inativa	2,89	29,2
	AM 04	42,0	23,5	18,5	0,98	normal	2,96	28,7
	AM 05	49,1	24,3	24,9	0,81	normal	2,89	30,0
	AM 06	52,1	22,7	29,4	1,08	normal	2,82	25,6
NA 01	AM 01	73,7	45,5	28,2	0,62	inativa	2,51	79,8
	AM 02	22,1	11,9	10,2	0,43	inativa	2,72	19,2
	AM 03	26,5	13,6	12,9	0,57	inativa	2,74	17,8
NA 02	AM 01	59,3	36,0	23,3	0,50	inativa	2,59	40,1
	AM 02	22,8	12,1	10,7	0,56	inativa	2,76	16,0
	AM 03	39,2	19,9	19,3	0,51	inativa	2,75	23,7
	AM 04	56,9	25,9	31,0	0,58	inativa	2,72	30,4
NA 03	AM 01	32,7	17,4	15,3	0,34	inativa	2,79	17,1
	AM 02	48,8	23,7	25,1	0,44	inativa	2,81	34,1
	AM 03	67,9	27,4	40,5	0,78	normal	2,79	34,6

O solo da área de estudo foi classificado pelo SUCS (Sistema Unificado de Classificação de solos) como CH (argila de alta plasticidade), se enquadrando na formulação Skempton (1953) como um solo de baixa atividade coloidal, não apresentando variações significativas em sua massa específica dos grãos.

Nos furos NA01 e NA02, apresentou-se umidade elevada na primeira camada devido à localização junto ao brejo e córrego, respectivamente, a jusante da ADRSU.

Nos demais furos, como era de se esperar, verificou-se um teor elevado de umidade nas amostras que se encontravam abaixo do nível freático.

5.1.8 Permeabilidade *In Situ*

Em linhas gerais, pode-se observar que os ensaios de laboratório apresentam como grande vantagem ter as condições de contorno bem controladas. Tem como desvantagem, entretanto o fato das características dos corpos de prova nem sempre serem mantidas durante a extração e transporte da amostra, e moldagem do corpo de prova. Os ensaios podem ser de carga variável ou de carga constante (FANTINATTI et al., 2006).

A tendência tem sido sugerir a execução de ensaios *in situ* com o argumento de que a área abrangida é maior e a estrutura do material é mais representativa (DA FONTOURA, DE CAMPOS & NOBRE, 1987). Baseado neste fato preteriu-se os ensaios de laboratório.

Nos Quadros 5.1 e 5.2 são apresentados respectivamente, valores típicos de coeficiente de permeabilidade e a classificação dos solos segundo seus coeficientes de permeabilidade.

Quadro 5.1 Valores típicos de coeficiente de permeabilidade (VERRUIJT,1982)

SOLO	VALOR DE K (m/s)
Argila	$< 10^{-9}$
Argila arenosa	$10^{-9} - 10^{-8}$
Turfa	$10^{-9} - 10^{-7}$
Silte	$10^{-8} - 10^{-7}$
Areia muito fina	$10^{-6} - 10^{-5}$
Areia fina	$10^{-5} - 10^{-4}$
Areia grossa	$10^{-4} - 10^{-3}$
Areia com pedregulho	$10^{-3} - 10^{-2}$
Pedregulho	$> 10^{-2}$

Quadro 5.2 Grau de permeabilidade dos solos segundo seus coeficientes de permeabilidade (LAMBE & WHITMAN, 1976)

GRAU DE PERMEABILIDADE	VALOR DE K (m/s)
Praticamente impermeável	$< 10^{-9}$
Muito baixa	$10^{-7} - 10^{-9}$
Baixa	$10^{-5} - 10^{-7}$
Média	$10^{-3} - 10^{-5}$
Elevada	$> 10^{-3}$

Ensaio de Carga Variável: Na Tabela 5.5 são apresentados os resultados obtidos com os ensaios de rebaixamento realizados (PZ101, PZ102, PZ103, PZ104, PZ106, PZ108, PZ109, PZ110 e PZ111) onde se observa os parâmetros utilizados nos cálculos dos coeficientes de permeabilidade, referente aos solos saturados nas respectivas profundidades.

Tabela 5.5 Resultados do ensaio de permeabilidade *in situ* com carga variável

PERMEÂMETRO	Profundidade do Ensaio (m)	d (cm)	D (cm)	L (cm)	K (m/s)
PZ101	1,68	1	10,0	50	$1,08 \times 10^{-4}$
PZ102	2,00	1	10,0	50	$3,02 \times 10^{-5}$
PZ103	1,90	1	10,0	50	$3,80 \times 10^{-5}$
PZ104	2,10	1	10,0	50	$1,78 \times 10^{-4}$
PZ106	2,20	1	10,0	50	$1,28 \times 10^{-4}$
PZ108	1,25	1	10,0	50	$7,94 \times 10^{-5}$
PZ109	5,10	1	10,0	15	$4,65 \times 10^{-10}$
PZ110	5,30	1	10,0	15	$4,01 \times 10^{-8}$
PZ111	4,70	1	7,5	15	$1,05 \times 10^{-7}$

Nos resultados dos ensaios com os piezômetros instalados abaixo de 4,70 m de profundidade (PZ109, PZ110 e PZ111), pode-se verificar um grau de permeabilidade variando de $4,65 \times 10^{-10}$ m/s a $1,05 \times 10^{-7}$ m/s, caracterizado com um solo de muito baixa permeabilidade a praticamente impermeável.

Na realização dos ensaios, verificou-se que a determinação do coeficiente de permeabilidade nos permeômetros PZ109, PZ110 e PZ111 apresentaram melhor operacionalidade de execução. Devido à célula de ensaio (volume da amostra) ser aproximadamente 75% menor do que nos outros permeômetros, o rebaixamento da coluna d'água tende a ocorrer de forma mais lenta permitindo uma maior precisão

das leituras e necessidade de um volume menor de água a ser transportada para realização do ensaio.

Observa-se que os valores de permeabilidade obtidos nos piezômetros instalados em profundidades inferiores 2,20 m (PZ 101, PZ102, PZ103, PZ106 e PZ108) não apresentaram diferenças significativas, variando de $3,02 \times 10^{-5}$ m/s a $1,08 \times 10^{-4}$ m/s, caracterizado como um solo de baixa permeabilidade.

Quando comparados aos valores apresentados na literatura (Quadro 5.1), os valores obtidos nos permeômetros PZ101, PZ102 e PZ106 são elevados considerando-se a granulometria do solo (Tabela 5.6).

Como pode ser constatado, confrontando os dados da Tabela 5.5 com a Tabela 5.6, tomando-se por base os valores típicos de permeabilidade do Quadro 5.1, a distribuição granulométrica pouco interferiu para os casos estudados.

O solo da área de estudo pode ser classificado, segundo os valores da literatura (Quadro 5.2), em três tipos de solo, uma primeira camada de solo com muito baixa permeabilidade (argila silto-arenosa), uma segunda com baixa permeabilidade (areia argilosa), e a terceira camada de solo abaixo de 5 m de profundidade, praticamente impermeável (argila arenosa), que tem funcionado como uma barreira natural do fluxo vertical, já que há uma diferença entre a permeabilidade dessa camada e a da diretamente superior, tornando assim o fluxo predominantemente horizontal (GERSCOVICH & CAMPOS, 1986).

Tabela 5.6 Resultados da caracterização do solo na camada ensaiada

FURO	CLASSIFICAÇÃO	GRANULOMETRIA		
		ARGILA (%)	SILTE (%)	AREIA (%)
PZ101	Argila silto-arenosa	56	22	22
PZ102	Argila areno-siltosa	48	25	27
PZ103	Areia argilosa	36	3	51
PZ104	Areia argilosa	39	14	47
PZ106	Argila silto-arenosa	42	29	29
PZ108	Areia argilosa	23	8	69
PZ109	Argila arenosa	52	13	35
PZ110	Argila arenosa	60	9	31
PZ111	Areia argilosa	27	6	67

A baixa permeabilidade e a pequena diferença dos valores de k obtidos, podem ser atribuídos, principalmente nos casos em que os piezômetros estão instalados próximos a superfície do terreno, à compacidade ou ao peso específico aparente do solo em que os piezômetros foram instalados (estrutura, índice de vazios, etc).

Quanto à realização do ensaio, verificou-se que a determinação do coeficiente de permeabilidade nos permeômetros PZ109, PZ110 e PZ111 apresentaram melhor operacionalidade e qualidade de execução. Devido à célula de ensaio (volume da amostra) ser aproximadamente 75% menor do que nos outros permeômetros, o rebaixamento da coluna d'água tende a ocorrer de forma mais lenta permitindo uma maior precisão das leituras e necessidade de um volume menor de água a ser transportada para realização do ensaio.

Ensaio de Carga Constante: Na Tabela 5.7 são apresentados os resultados obtidos com os ensaios de furo realizados ao lado dos piezômetros PZ101, PZ102, PZ103, PZ104, PZ106 e PZ108, onde se observa a profundidade dos solos ensaiada.

Os valores de permeabilidade nos furos G101, G102, G109, G110 e G111 não foram satisfatórios, apresentando erros nas leituras e conseqüentemente nos resultados, possivelmente devido à limitação do permeômetro de Guelph ($10^{-4} < k < 10^{-8}$ m/s) (MAHLER & AGUIAR, 2002), pois provavelmente a permeabilidade estaria abaixo de 10^{-8} m/s (G101 e G102) ou acima de 10^{-4} m/s (G109, G110 e G111).

Tabela 5.7 Resultados do ensaio de permeabilidade *in situ* com carga constante

LOCALIZAÇÃO	FURO	Profundidade do Ensaio (m)	K (m/s)
PZ101	G101	0,40	*
PZ102	G102	0,40	*
PZ103	G103	0,40	$4,87 \times 10^{-7}$
PZ104	G104	0,40	$8,26 \times 10^{-5}$
PZ106	G106	0,40	$3,14 \times 10^{-6}$
PZ108	G108	0,40	$2,69 \times 10^{-5}$
PZ109	G109	0,40	*
PZ110	G110	0,40	*
PZ111	G111	0,40	*

* não satisfatório

Quando comparados aos valores apresentados na literatura (Quadro 5.1), os valores obtidos nos furos G104 e G106 são compatíveis para a fração de solo predominante (Tabela 5.8). Já no furo G103, a permeabilidade é muito baixa em comparação com a granulometria do solo, possivelmente pela compactação decorrente do tráfego pesado dos caminhões de coleta de RSU no trecho ensaiado. Em relação ao furo G108, possivelmente a baixa permeabilidade deve-se a fração argila da camada ensaiada.

Tabela 5.8 Resultados da caracterização do solo na camada ensaiada

FURO	CLASSIFICAÇÃO	GRANULOMETRIA		
		ARGILA (%)	SILTE (%)	AREIA (%)
G101	Argila silto-arenosa	59	20	21
G102	Argila siltosa	57	34	9
G103	Areia argilo-siltosa	36	27	38
G104	Argila silto-arenosa	46	30	24
G106	Argila silto-arenosa	46	31	23
G108	Areia argilo-siltosa	41	14	45
G109	Areia argilosa	34	9	57
G110	Areia argilosa	23	10	67
G111	Areia argilosa	23	9	68

Baseado nos resultados obtidos nos furos G103 e G106 (Tabela 5.7), foi feita uma diferenciação da camada de lixo misturado com solo do perfil do talvegue em duas camadas distintas: lixo misturado com solo compactado com $k = 10^{-7}$ m/s e simplesmente lixo misturado com solo com $k = 10^{-6}$ m/s.

Quanto à realização do ensaio, verificou-se que a determinação do coeficiente de permeabilidade com o permeâmetro de Guelph apresentou as vantagens da facilidade de transporte do aparelho, possibilidade da realização do ensaio em terrenos irregulares, rapidez nos ensaios e pouca quantidade de água a ser utilizada por ensaio. Em contrapartida, tem como desvantagens, a limitação do permeâmetro na obtenção de coeficiente.

5.1.9 Monitoramento das Cargas Hidráulicas

Na Tabela 5.9 são apresentadas as leituras do monitoramento das cargas hidráulicas realizado na instrumentação a montante (PZ106, PZ108, NA03 e LN01) e a jusante, no brejo (PZ101, PZ102 e NA01) e no córrego (PZ103, PZ104, NA02 e LN02), onde os valores negativos significam as leituras efetuadas acima da cota do terreno. Este monitoramento da dinâmica das águas sub-superficiais e superficiais tem por objetivo obter dados para aplicação dos aplicativos SEEP/W e CTRAN/W na modelagem do fluxo e do transporte dos contaminantes da ADRSU.

Observou-se uma alteração significativa na hidrografia local devido à alta taxa de pluviosidade no período de dezembro de 2005, com considerável aumento da área de escoamento, bem como do volume da mesma, o que ocasionou no surgimento de vertentes da lagoa ao sul da ADRSU, e o extravasamento da lagoa em determinados pontos da estrada de terra.

As leituras de 15 de dezembro de 2005 e 10 de março de 2006 apresentam características atípicas, porque nestas datas a estrada de terra, que funciona com uma barragem de pequena altura, foi seccionada transversalmente com a escavação de um vertedouro emergencial (Figuras 5.3 a 5.6) para extravasar as águas a montante desta bacia de drenagem, visto que estava inundando as casas do bairro Jardim Ceasa, junto a Lagoa do Sapo, devido à alta pluviosidade no período. Essas leituras atípicas são provocadas pelo equilíbrio das águas a montante e a jusante ocasionado pela abertura da estrada.

Tabela 5.9 Leituras do monitoramento das cargas hidráulicas

LEITURA (cm)		INSTRUMENTAÇÃO											
Nº	DATA	MONTANTE				JUSANTE							
		PZ 106	PZ 108	NA 03	LN 01	brejo			córrego				
		PZ 101	PZ 102	NA 01	PZ 103	PZ 104	NA 02	LN 02					
1	15/12/05	54	-24	88	100	-24	-1	6	-29	14	22	48	
2	16/01/06	47	-37	89	46	-3	20	36	19	62	72	25	
3	20/01/06	49	-34	92	45	1	23	39	21	73	82	23	
4	23/01/06	48	-36	94	44	2	30	45	26	81	90	22	
5	27/01/06	46	-35	94	44	4	31	47	29	88	98	21	
6	30/01/06	46	-35	91	44	-2	22	37	20	71	80	21	
7	03/02/06	48	-37	90	44	2	25	41	26	69	82	22	
8	06/02/06	50	-39	93	44	3	30	46	24	81	91	22	
9	10/02/06	51	-42	96	44	4	34	48	29	93	102	22	
10	13/02/06	49	-40	91	42	2	33	46	26	90	100	21	
11	17/02/06	44	-43	92	43	-1	27	40	20	45	57	22	
12	20/02/06	46	-38	93	43	-4	20	37	22	30	41	19	
13	24/02/06	44	-37	92	43	-6	14	32	22	30	42	26	
14	27/02/06	43	-39	91	41	-7	12	30	19	26	37	17	
15	03/03/06	47	-36	95	44	-4	14	32	21	26	37	20	
16	10/03/06	72	16	113	109	-26	-3	15	7	-8	3	13	

* A origem das leituras refere-se ao NT sendo os valores positivos correspondentes às leituras abaixo do NT e os negativos correspondentes às leituras acima do NT



Figura 5.3 Vertedouro emergencial (dez/05)



Figura 5.4 Fechamento do vertedouro (dez/05)



Figura 5.5 Reabertura do vertedouro (mar/06)



Figura 5.6 Detalhe do vertedouro (mar/06)

No Gráfico 5.27 apresenta-se o resultado das cargas piezométricas, referente às leituras do monitoramento dos PZ101, PZ102, PZ103, PZ104, PZ106 e PZ108.

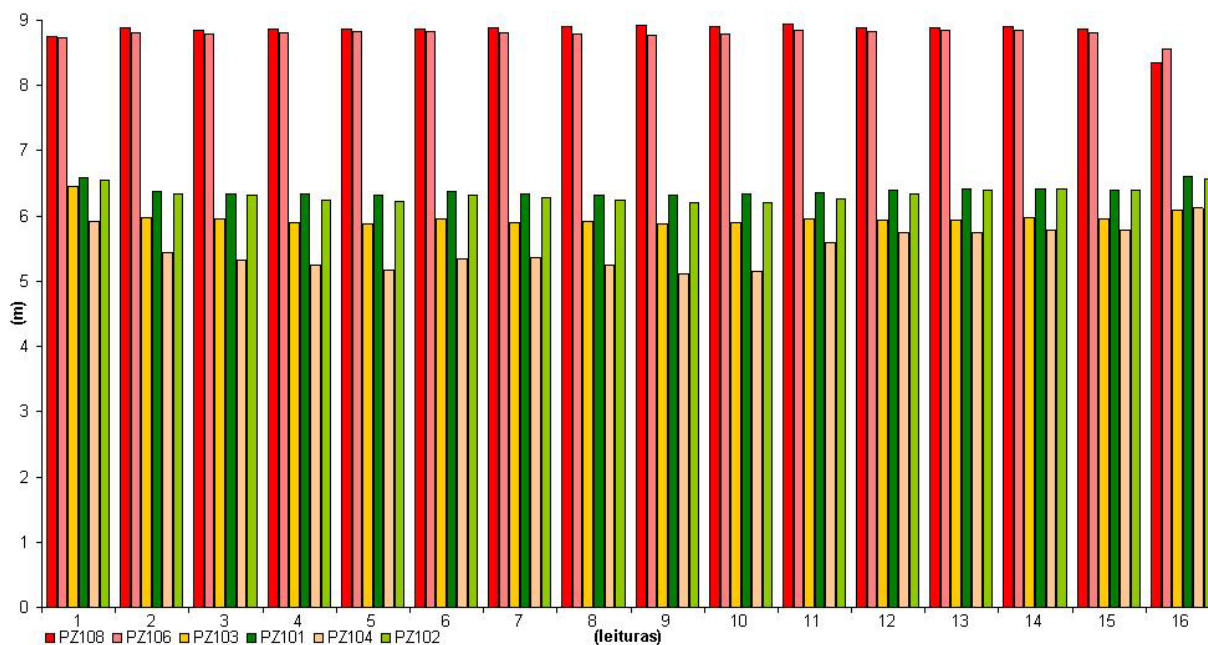


Gráfico 5.27 Resultado das cargas piezométricas

Observa-se que as maiores cargas piezométricas pertencem aos piezômetros PZ106 e PZ108, que se encontram a montante. Estas cargas também apresentam grandes variações quando comparados com as cargas piezométricas a jusante.

As cargas piezométricas obtidas, mais uma vez, confirmam a hipótese de fluxo na direção oeste-leste. Observa-se na instrumentação instalada na área a montante, valores de carga total superior à instrumentação instalada a jusante.

No Gráfico 5.28 apresenta-se o resultado dos níveis de referência, referentes às leituras do monitoramento dos NA01, NA02 e NA03 (águas subterrâneas) e dos LN01 e LN02 (águas superficiais).

Comparando o Gráfico 5.28 com as cotas altimétricas de implantação dos níveis d'água, observa-se que a montante, no NA03, o nível freático encontra-se a aproximadamente 90 cm, e a jusante, no brejo (NA01) e no córrego (NA02) o mesmo encontra-se a aproximadamente 40 e 70 cm, respectivamente, caracterizando o aquífero como sendo raso.

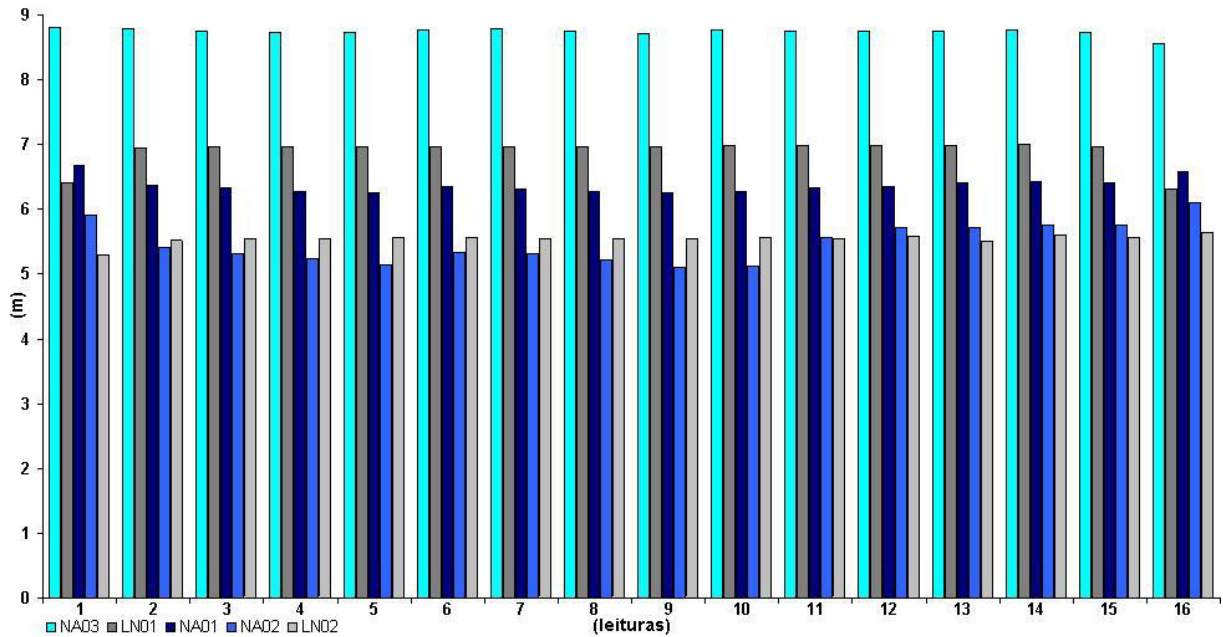


Gráfico 5.28 Resultado dos níveis de referência

Observa-se que não houve variações significativas em cada nível de referência, sugerindo que o padrão de fluxo durante o período de monitoramento não apresentou alterações significativas.

Observa-se uma diferença média entre os níveis das águas da lagoa (LN01) e do córrego (LN02) da ordem de 1,5 m de carga hidráulica. Esses dados comprovam a hipótese de que a estrada de terra tem funcionado como uma barragem de pequena altura.

No Gráfico 5.29 apresenta-se o resultado das cargas hidráulicas a montante, referente às leituras do monitoramento dos PZ106, PZ108, NA03 e LN01.

Observa-se que as cargas hidráulicas a montante apresentam um regime uniforme, apresentando pequenas variações, excetuando-se as leituras atípicas (leituras 1 e 16).

No Gráfico 5.30 apresenta-se o resultado das cargas hidráulicas a jusante, referente às leituras do monitoramento dos PZ101, PZ102 e NA01 (localizado no brejo) e dos PZ103, PZ104, NA02 e LN02 (localizado no córrego).

Observa-se que as cargas hidráulicas no brejo sofrem pequenas variações em seus valores. Constatou-se que o PZ102, por apresentar leituras inferiores ao nível freático do NA01, não tem funcionado como piezômetro, provavelmente por ter-se rompido o selo de bentonita.

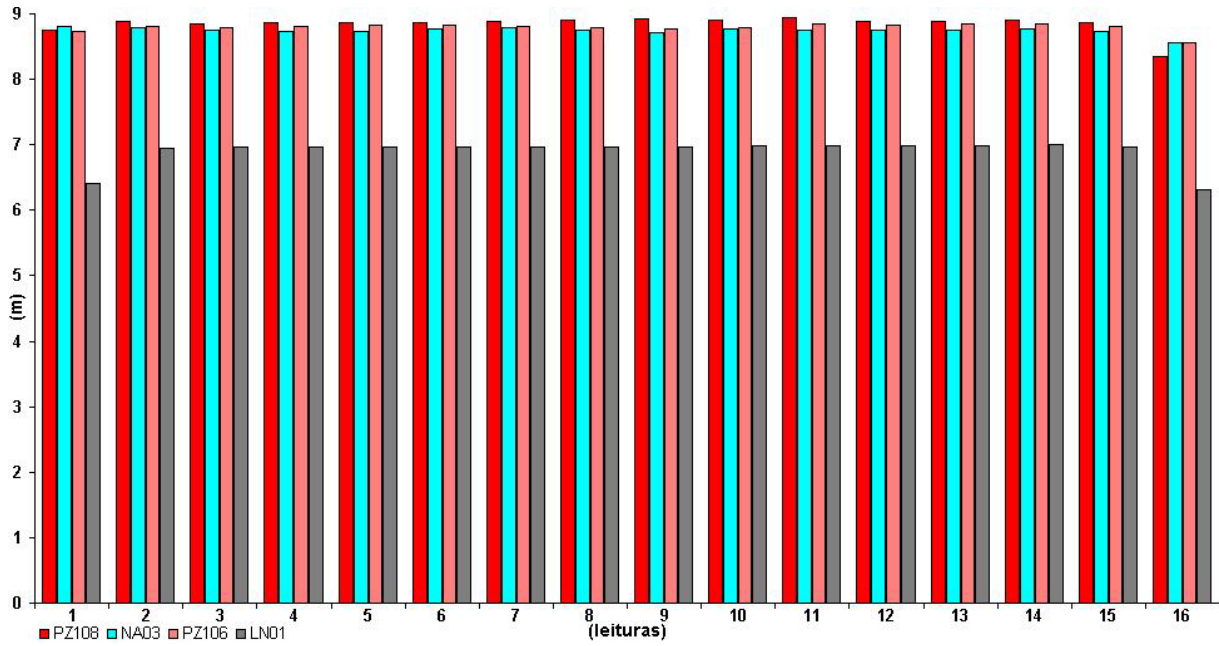


Gráfico 5.29 Resultado das cargas hidráulicas a montante

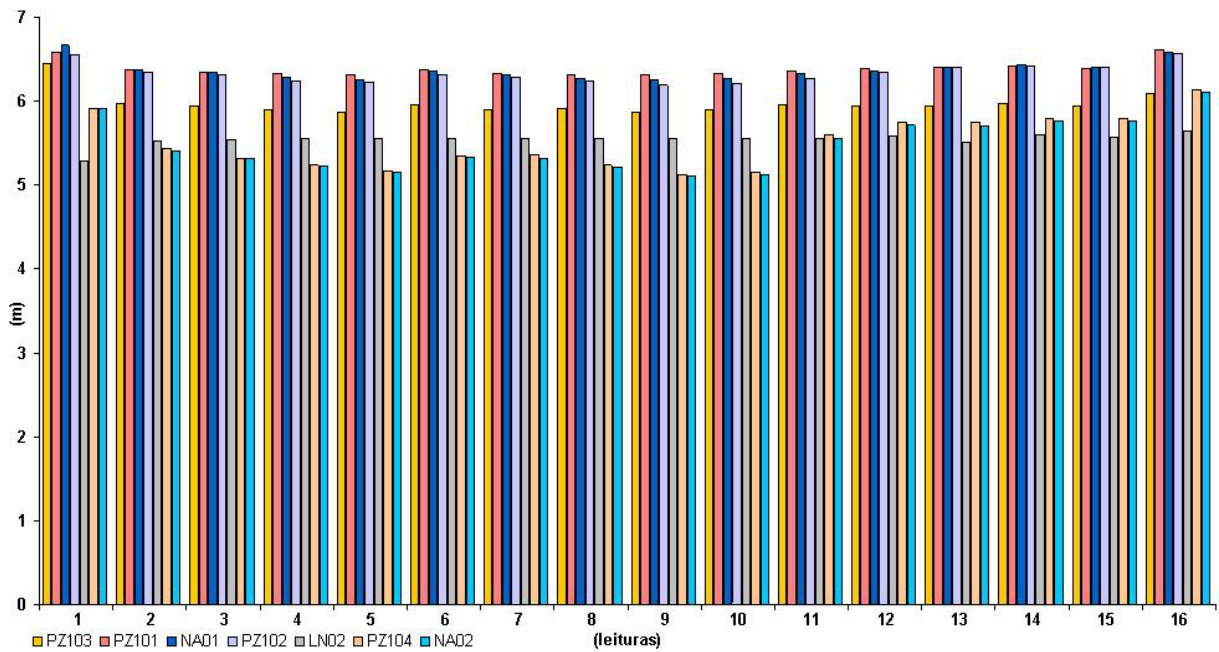


Gráfico 5.30 Resultado das cargas hidráulicas a jusante, no brejo

Verificam-se cargas piezométricas elevadas no piezômetro PZ103, uma vez que este se encontra instalado junto à barragem. Observa-se que o nível freático (NA02) supera o nível das águas superficiais (LN02) no período de alta pluviosidade.

5.2 ANÁLISE GEOQUÍMICA

Os resultados dos ensaios apresentados a seguir são referentes às amostras de solo, coletadas nos furos de sondagem dos PZ109, PZ110 e PZ111 realizados na área de estudo.

5.2.1 Caracterização Química

Na Tabela 5.10 são descritos os resultados da caracterização química do solo realizados no laboratório do Departamento de Produção Vegetal da FUNDENOR – Fundação Norte Fluminense de Desenvolvimento Regional, com os dados de CTC, teor de MO, teor de metais pesados (Cu e Zn) e valor de pH.

Tabela 5.10 Resultados da caracterização química do solo

ANÁLISE DE SOLO		CTC (mmol/dm ³)	MO (g/dm ³)	METAIS PESADOS (mg/dm ³)		pH (H ₂ O)
FURO	AMOSTRA			Cu	Zn	
PZ109	AM 01	52,70	10,86	0,05	0,59	4,3
	AM 02	31,40	02,93	0,06	0,61	4,1
	AM 03	26,40	01,72	0,15	0,94	4,9
	AM 04	34,00	01,72	0,21	0,73	5,1
	AM 05	30,80	01,72	0,25	0,70	4,7
PZ110	AM 01	45,40	17,58	0,08	0,12	4,7
	AM 02	35,80	09,48	0,06	0,83	4,3
	AM 03	28,40	06,21	0,08	0,37	4,5
	AM 04	17,20	01,21	0,06	0,31	5,2
	AM 05	26,80	01,21	0,15	0,71	5,1
PZ111	AM 01	50,70	16,03	0,11	0,49	4,3
	AM 02	41,70	12,41	0,10	0,19	4,3
	AM 03	32,10	07,41	0,13	0,28	4,3
	AM 04	35,30	06,90	0,10	2,36	4,5
	AM 05	26,20	03,62	0,08	4,63	4,5
	AM 06	21,50	02,41	0,09	14,20	4,7

A classificação da atividade da argila, baseada em dados da CTC (OLIVEIRA et al.,1992), é dada como de baixa atividade, uma vez que se obteve valores

inferiores a 240 mmol/dm³. Essa classificação vem a confirmar a avaliação por meio da formulação de Skempton (1953).

Baseado nos resultados obtidos na CTC pode-se sugerir, segundo Nobre, De Campos & Da Fontoura (1995), que o argilo-mineral predominante é a caulinita, uma vez que os valores obtidos estão entre 30 e 150 mmol/dm³.

Observa-se que houve variações nos valores de CTC, demonstrando que houve trocas de cátions, uma vez que os valores tenderam a diminuir. Fato confirmado pelo caráter ácido do solo (pH < 7) (DA FONTOURA, DE CAMPOS & NOBRE, 1987).

Verifica-se o decréscimo dos valores de MO em relação à profundidade, coincidindo com o aumento do pH. Esse fato deve-se provavelmente a degradação da MO (CASTILHOS JR. et al., 2003).

Em relação aos teores de metais pesados encontrados, em termos gerais, os valores tenderam a aumentar com a profundidade, constatando que houve uma atenuação dos metais, provavelmente devido à característica argilosa do solo. A diminuição da condutividade hidráulica da camada de argila arenosa provavelmente pode ter sido causada pela obstrução dos poros por precipitação dos metais pesados, uma vez que este é um dos principais mecanismos de atenuação dos metais pesados Cu e Zn (PRIM, DE OLIVEIRA & CASTILHOS JR., 2003) e o pH ser ácido (pH < 7) (NOBRE, DE CAMPOS & DA FONTOURA, 1987).

5.2.2 Identificação Química por Difração de Raios-X

Na Tabela 5.11 são descritos os resultados dos ensaios de difração por raios-X (EDX) realizados no LECIV da UENF.

A análise química revelou tratar-se de um solo residual constituído predominantemente do argilo-mineral caulinita, confirmando a análise pela CTC. Assim sendo, as trocas catiônicas serão pouco influenciadas pela mineralogia do solo, e por analogia, o transporte de contaminantes também (LAMBE & WHITMAN, 1976).

Caracterizando a predominância do argilo-mineral caulinita, temos, portanto, uma superfície específica do solo pequena em comparação a outros argilo-minerais. Essa propriedade mineralógica é a que mais influencia o comportamento

hidrodinâmico do meio poroso, além de estarem relacionadas a essa propriedade a sorção e a CTC, que afetarão o comportamento macroscópico e propriedades mecânicas, como plasticidade (PRIM, DE OLIVEIRA & CASTILHOS JR., 2003).

Verificou-se nas amostras ensaiadas a predominância de óxido de silício e de alumínio, e em menor intensidade de óxidos de ferro, perfil característico de latossolos (VIEIRA et al., 2006 apud MOREIRA, 2004).

Tabela 5.11 Resultado do EDX

%	PZ109					PZ110					PZ111					
	AMOSTRA					AMOSTRA					AMOSTRA					
	01	02	03	04	05	01	02	03	04	05	01	02	03	04	05	06
SiO ₂	43.39	45.75	46.53	46.39	42.75	41.20	37.45	33.0	45.29	42.62	40.92	31.84	37.20	31.48	35.89	40.56
Al ₂ O ₃	39.53	43.82	43.76	43.24	40.40	36.44	39.21	34.19	39.9	41.96	37.20	31.50	40.92	30.18	35.45	38.39
Fe ₂ O ₃	8.46	3.55	3.28	4.139	11.12	11.67	16.90	24.47	3.47	10.83	13.19	30.62	13.19	23.13	22.23	13.16
TiO ₂	4.45	3.87	3.07	2.77	2.69	4.26	3.34	3.55	2.62	2.37	3.55	2.99	3.55	11.45	2.23	3.72
P ₂ O ₅	2.09	0.84	1.18	1.33	0.88	4.01	1.40	2.60	6.39	*	3.14	1.81	3.14	1.88	1.89	1.95
SO ₃	1.69	1.84	1.62	1.73	1.80	2.06	1.57	1.88	1.74	1.78	1.68	1.08	1.68	1.68	1.91	1.78
V ₂ O ₅	0.22	0.19	0.16	0.15	0.07	0.22	0.08	0.09	0.13	0.07	0.22	0.10	0.22	0.09	0.06	0.10
ZrO ₂	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.02	0.04	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01
CuO	*	*	*	*	0.03	0.03	*	*	*	*	0.04	*	*	0.04	*	0.04
ZnO	*	0.02	*	*	*	0.02	*	*	0.01	*	*	*	*	*	*	0.02
Ir ₂ O ₃	*	0.03	0.05	*	*	*	*	0.10	0.07	*	*	*	*	*	*	*
K ₂ O	*	-	0.19	0.20	*	*	*	*	50.25	0.26	*	*	*	*	*	0.21
Cr ₂ O ₃	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0.06	*	*	*	*	0.07	*

* não encontrado

6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Para avaliação numérica da contaminação por metais pesados, especificamente do Cu e Zn, foram realizadas simulações numéricas utilizando-se os aplicativos SEEP/W (GEOSLOPE, 1998a) e CTRAN/W (GEOSLOPE, 1998b) que avaliam o fluxo e o transporte bidimensional de contaminantes em meios porosos.

6.1 APLICATIVO SEEP/W

6.1.1 Discretização do Meio Físico

Foram consideradas para simulação inicial de fluxo as seguintes condições: os níveis da lagoa nos meses de janeiro (com a estrada funcionando como uma barragem), e março (após o rompimento da estrada).

Baseado nos resultados obtidos na caracterização tátil-visual, análise granulométrica e permeabilidade *in situ* foi definido um perfil com cinco camadas de solo. Considerando-se a caracterização granulométrica do lodo da lagoa realizada por Tibana et al. (2003) (Quadro 6.1) e os valores típicos de permeabilidade (Quadro 5.1) fez-se uma diferenciação do solo misturado com lixo referente ao solo do fundo da lagoa (lodo), adotando-se, portanto, um valor de permeabilidade $k=10^{-3}$ m/s.

Quadro 6.1 Granulometria do lodo do fundo da lagoa (TIBANA et al., 2003)

GRANULOMETRIA – LODO DA LAGOA					
ARGILA (%)	SILTE (%)	AREIA			PEDREGULHO (%)
		fina	(%) média	grossa	
14	6	37	26	16	1

A Figura 6.1 apresenta a seção discretizada utilizada para a realização das simulações numéricas, apresentando-se as duas condições dos níveis das águas a serem analisadas.

Figura 6.1 Seção discretizada para a análise de fluxo no programa SEEP/W da GEOSLOPE

6.1.2 Parâmetros para Análise

Foram obtidos por meio de ensaios de campo e de laboratório e também monitoramento das águas subterrâneas e superficiais.

Caracterização: As descrições do solo são apresentadas no Quadro 6.2.

Quadro 6.2 Tipos de solos

SOLO	CLASSIFICAÇÃO
1	Argila silto-arenosa
2	Lixo + solo
3	Lixo + solo (lodo)
4	Lixo + solo (compactado)
5	Areia argilosa
6	Argila arenosa

Permeabilidade: As permeabilidades dos solos são apresentadas no Quadro 6.3.

Quadro 6.3 Valores de permeabilidade dos solos

SOLO	K (m/s)
1	1×10^{-5}
2	1×10^{-6}
3	1×10^{-3}
4	1×10^{-7}
5	1×10^{-5}
6	1×10^{-8}

Carga Hidráulica: Os valores da carga totais foram calculados a partir correlação entre as cargas piezométricas e dos níveis d'água. Para a análise, considerou-se carga hidráulica em três pontos distintos: a montante, no NA03 e LN01, e a jusante no LN02, que são apresentadas no Quadro 6.4.

Quadro 6.4 Valores das cargas hidráulicas

condição	MONTANTE		JUSANTE
	NA03 (m)	LN01 (m)	LN02 (m)
JAN	13,0	10,5	9,5
MAR	12,5	10,0	10,0

Condições de Contorno: A discretização da seção analisada em uma malha de elementos finitos quadrilaterais de 4 nós e triangulares de 3 nós, para análise de fluxo, é apresentado nas Figuras 6.2 e 6.3.

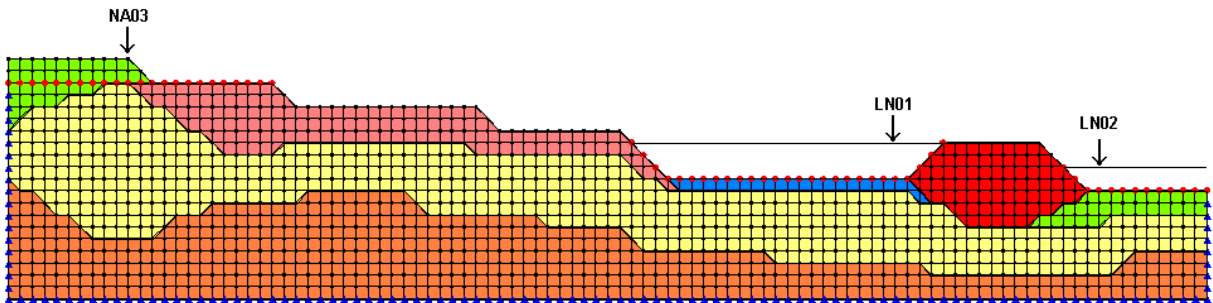


Figura 6.2 Malha de elementos finitos da condição Janeiro/2006

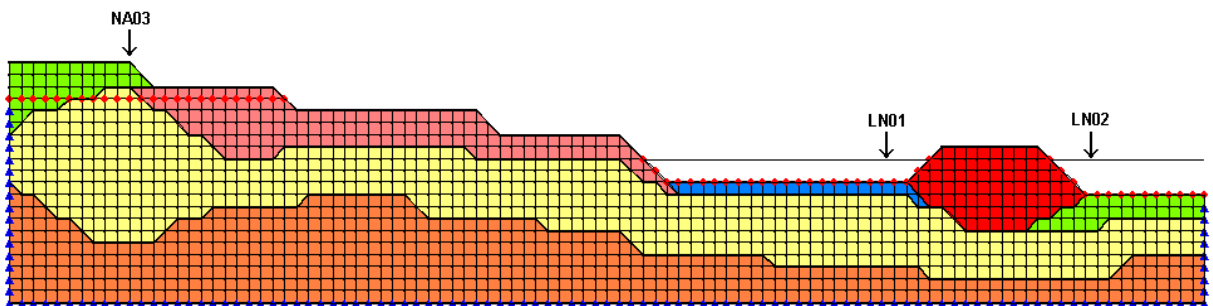


Figura 6.3 Malha de elementos finitos da condição Março/2006

Os gráficos das funções de condutividade hidráulica e de teor volumétrico de água versus pressão utilizados para a condição janeiro/2006 estão apresentados nos Gráficos 6.1 a 6.12.

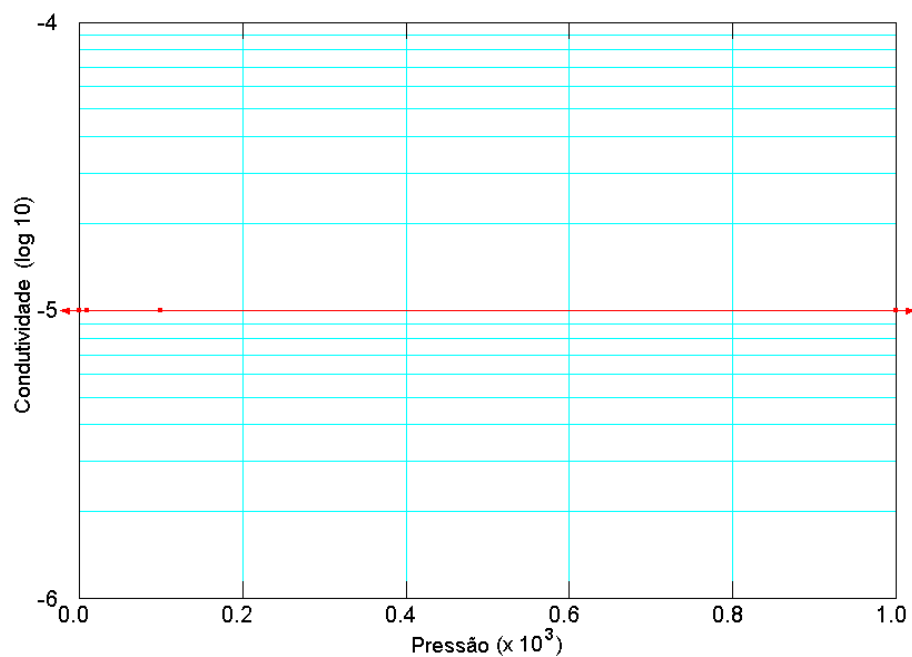


Gráfico 6.1 Função de condutividade (m/s) versus pressão (kPa) referente ao Solo 1

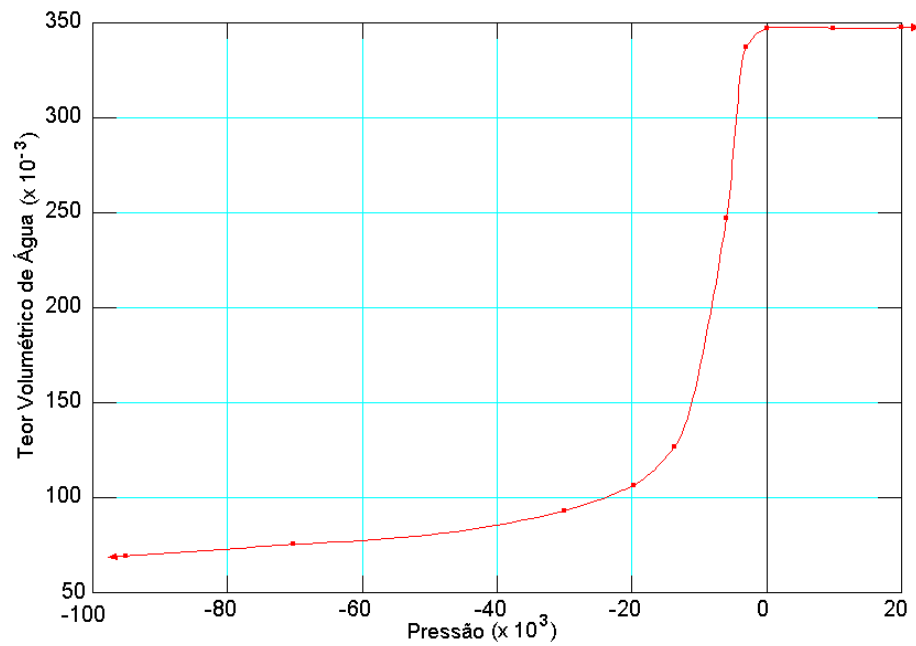


Gráfico 6.2 Função teor volumétrico de água versus pressão referente ao Solo 1

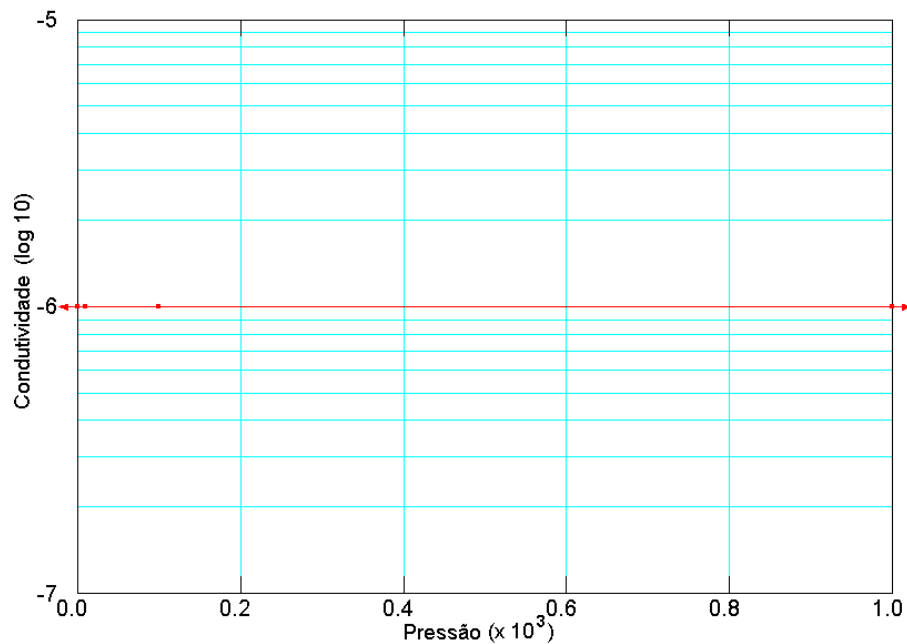


Gráfico 6.3 Função de condutividade (m/s) versus pressão (kPa) referente ao Solo 2

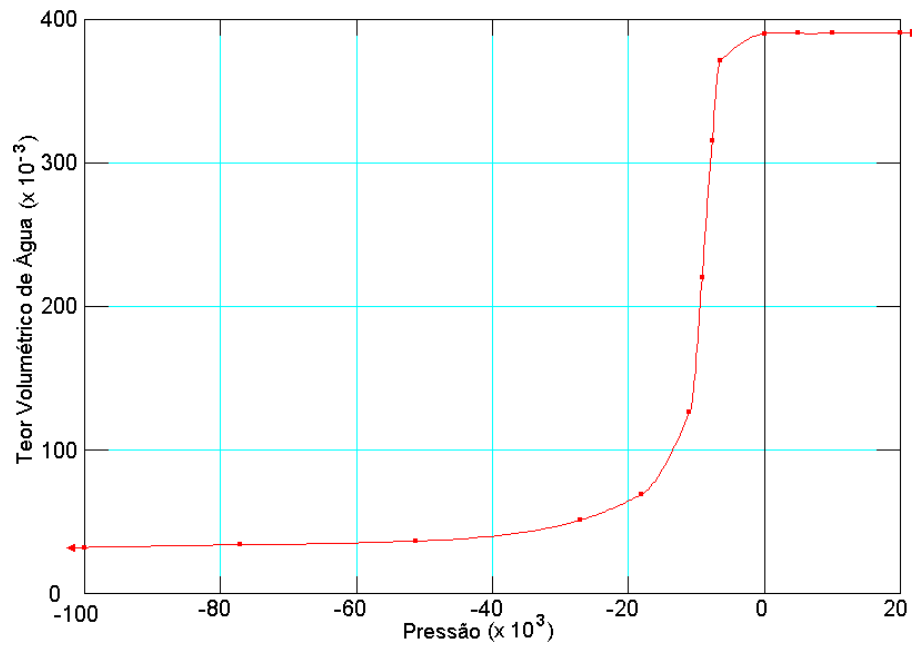


Gráfico 6.4 Função teor volumétrico de água versus pressão referente ao Solo 2

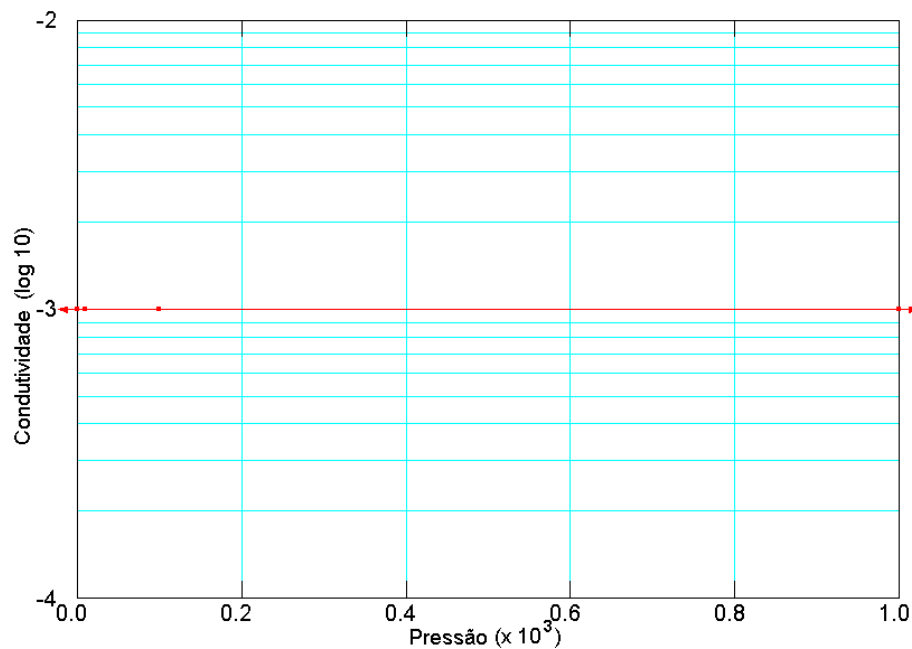


Gráfico 6.5 Função de condutividade (m/s) versus pressão (kPa) referente ao Solo 3

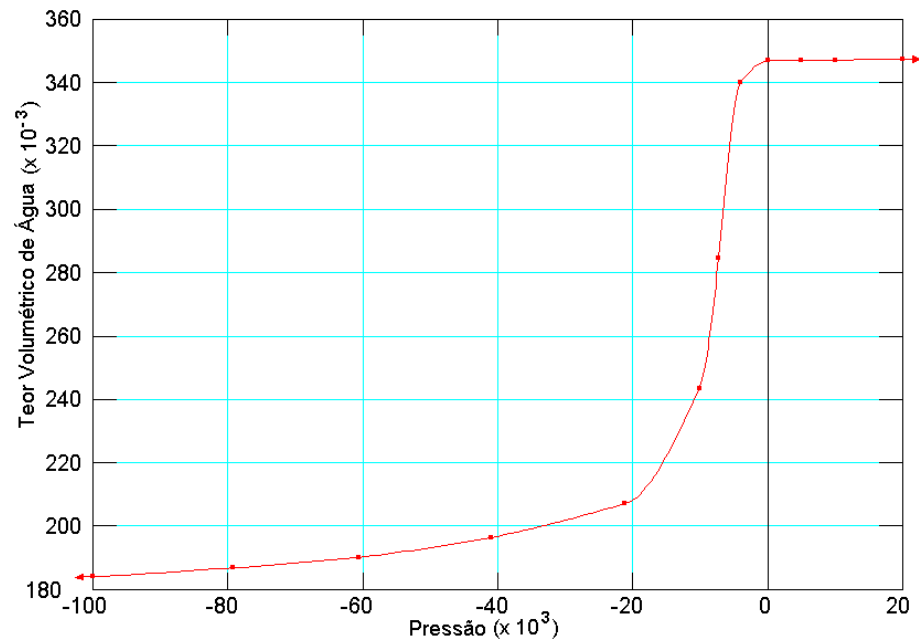


Gráfico 6.6 Função teor volumétrico de água versus pressão referente ao Solo 3

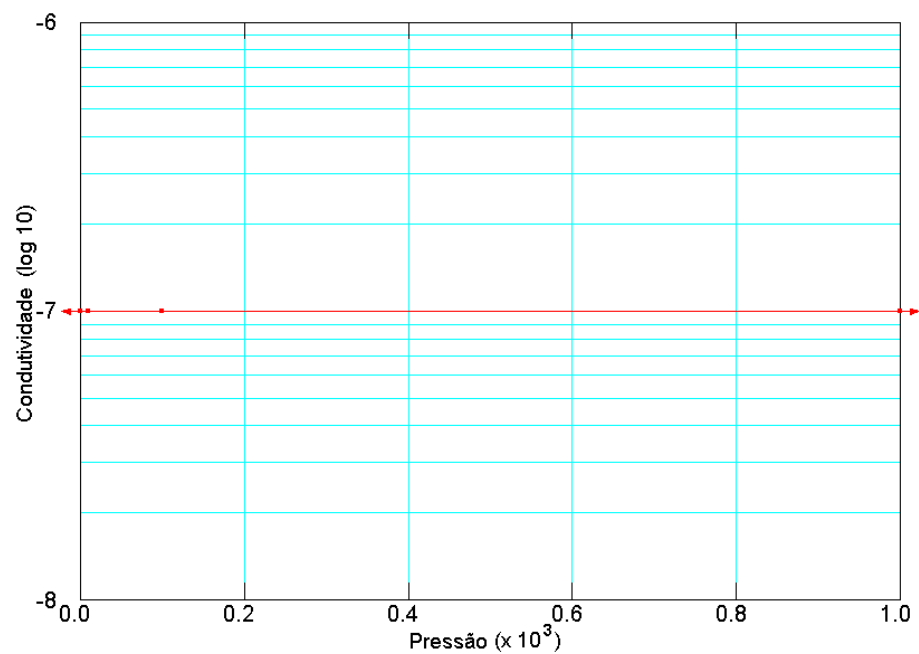


Gráfico 6.7 Função de condutividade (m/s) versus pressão (kPa) referente ao Solo 4

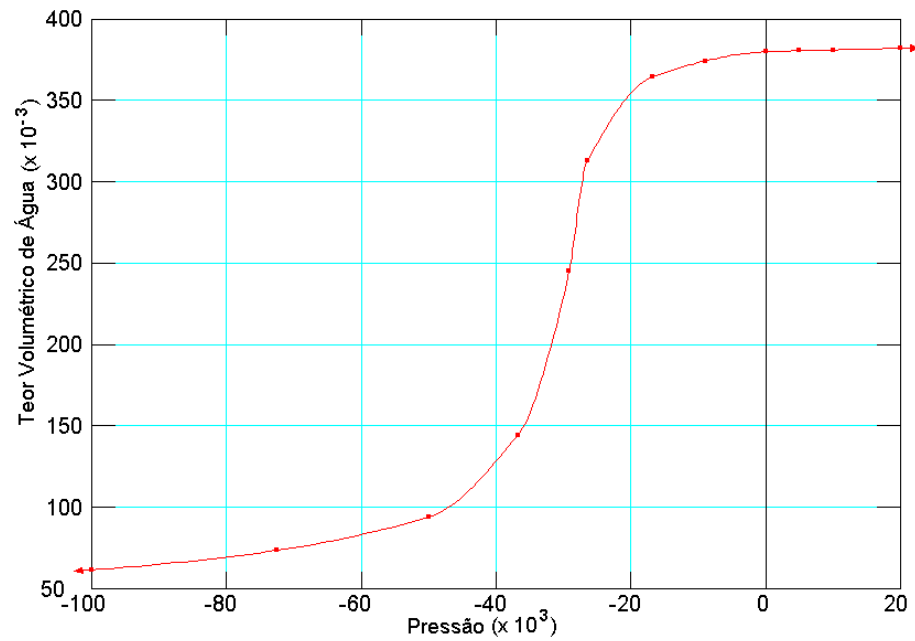


Gráfico 6.8 Função teor volumétrico de água versus pressão referente ao Solo 4

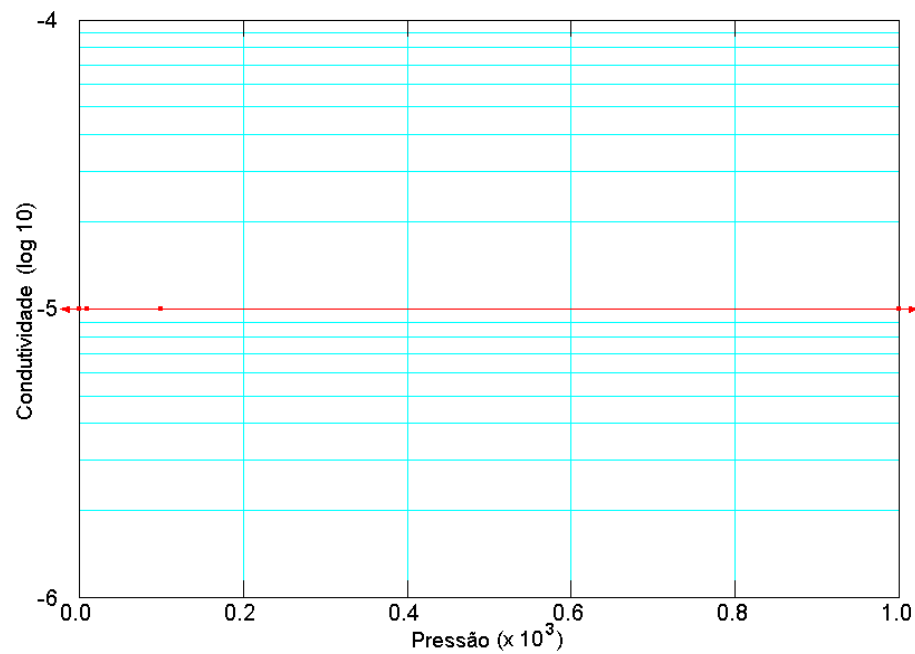


Gráfico 6.9 Função de condutividade (m/s) versus pressão (kPa) referente ao Solo 5

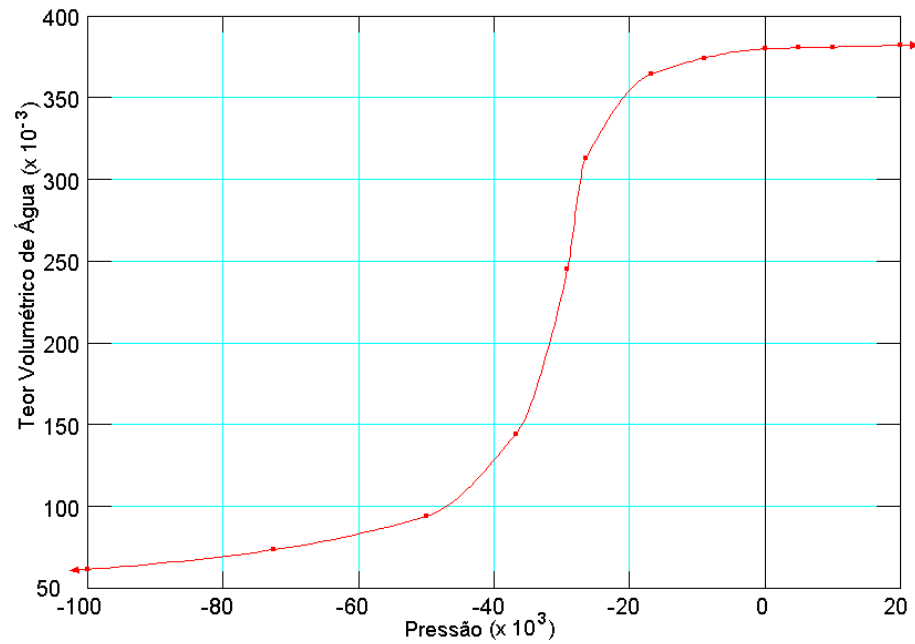


Gráfico 6.10 Função teor volumétrico de água versus pressão referente ao Solo 5

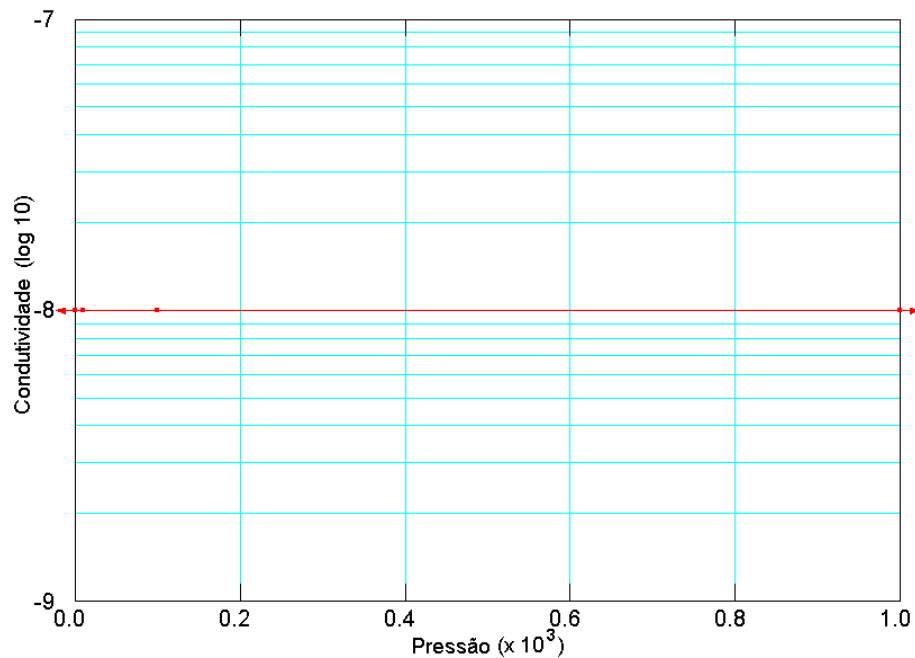


Gráfico 6.11 Função de condutividade (m/s) versus pressão (kPa) referente ao Solo 6

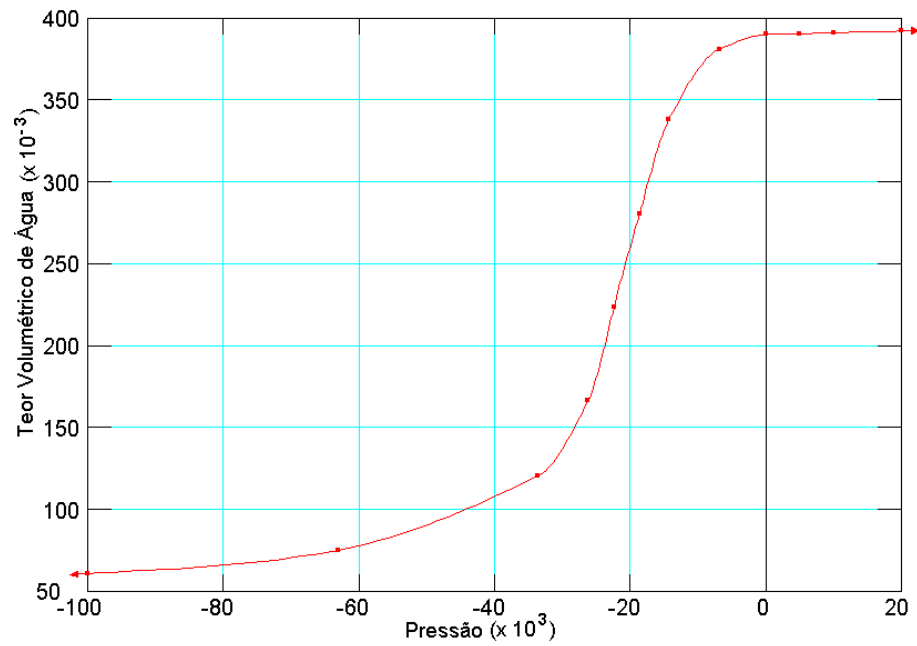


Gráfico 6.12 Função teor volumétrico de água versus pressão referente ao Solo 6

Os gráficos das funções de condutividade hidráulica e de teor volumétrico de água versus pressão utilizados para a condição janeiro/2006 estão apresentados nos Gráficos 6.13 a 6.24.

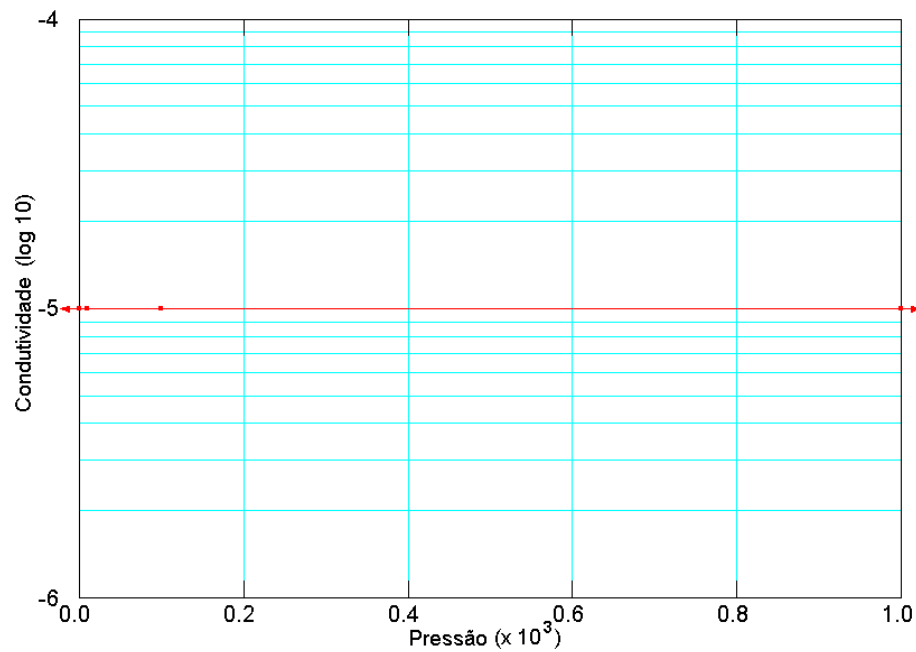


Gráfico 6.13 Função de condutividade (m/s) versus pressão (kPa) referente ao Solo 1

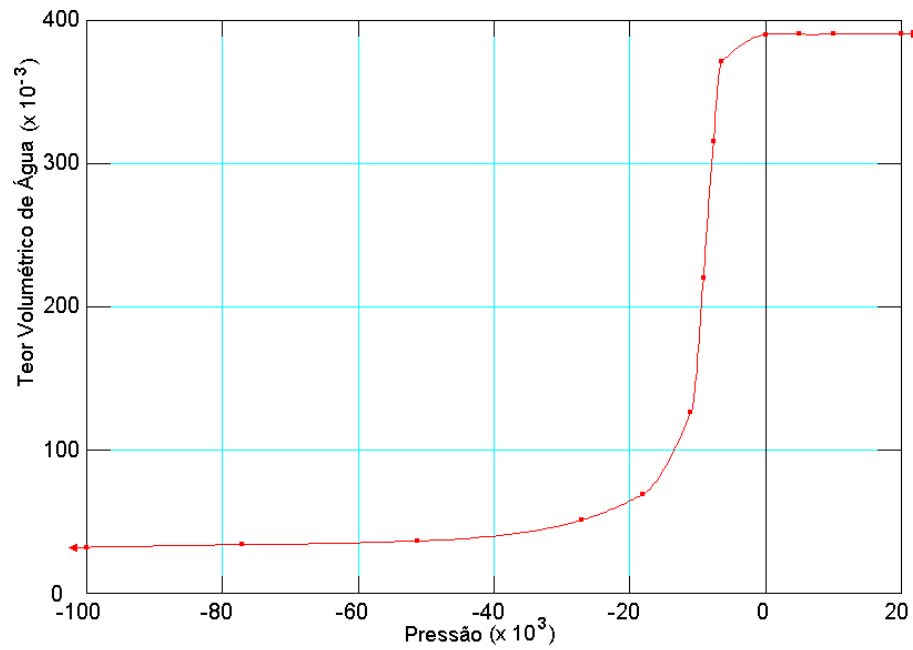


Gráfico 6.14 Função teor volumétrico de água versus pressão referente ao Solo 1

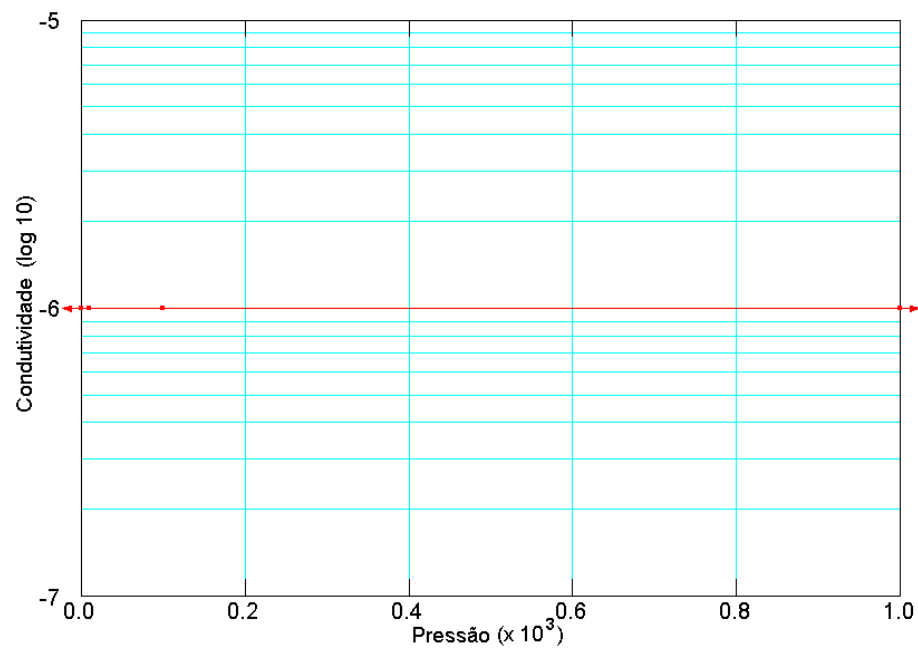


Gráfico 6.15 Função de condutividade (m/s) versus pressão (kPa) referente ao Solo 2

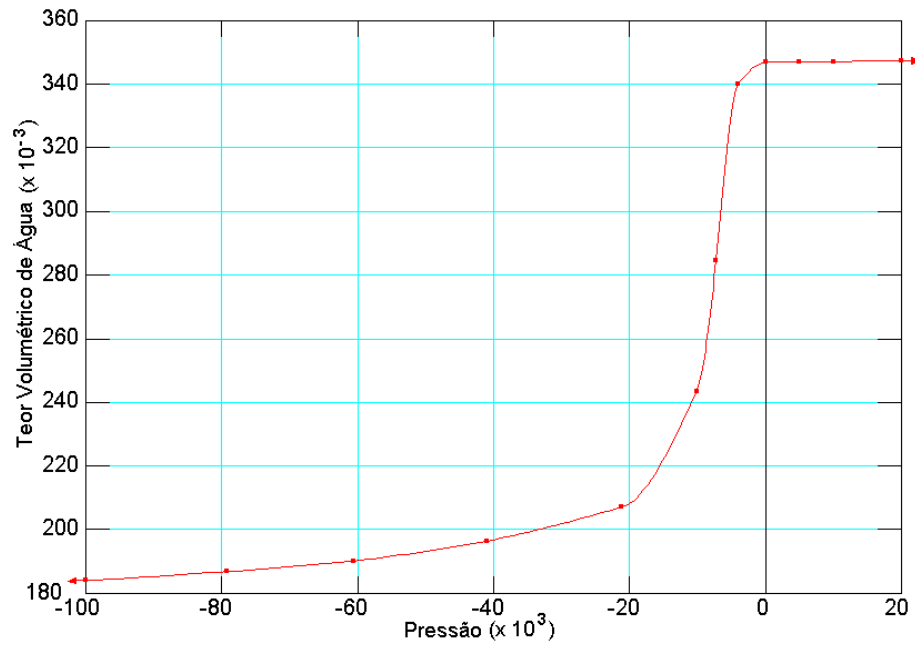


Gráfico 6.16 Função teor volumétrico de água versus pressão referente ao Solo 2

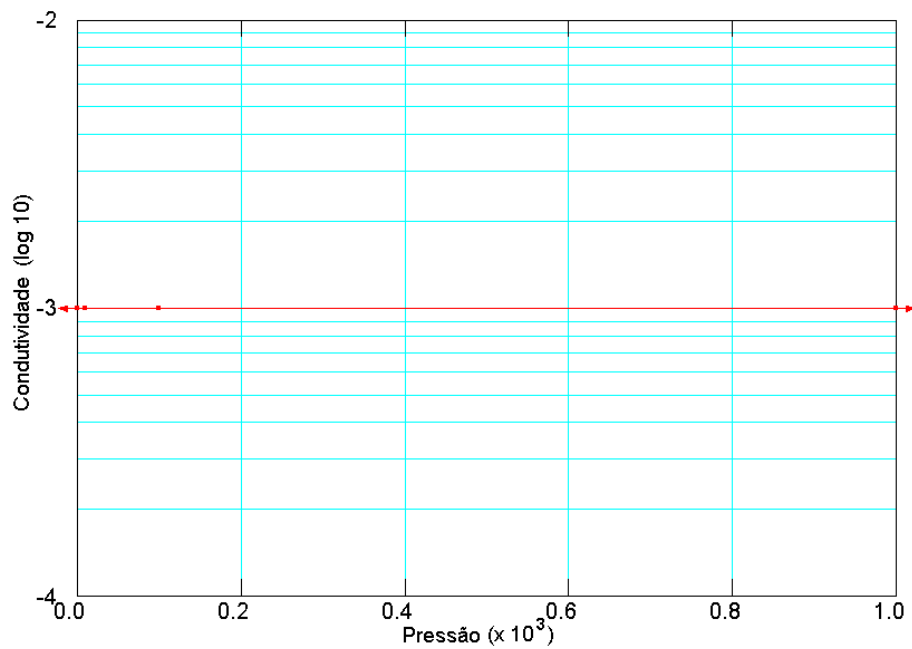


Gráfico 6.17 Função de condutividade (m/s) versus pressão (kPa) referente ao Solo 3

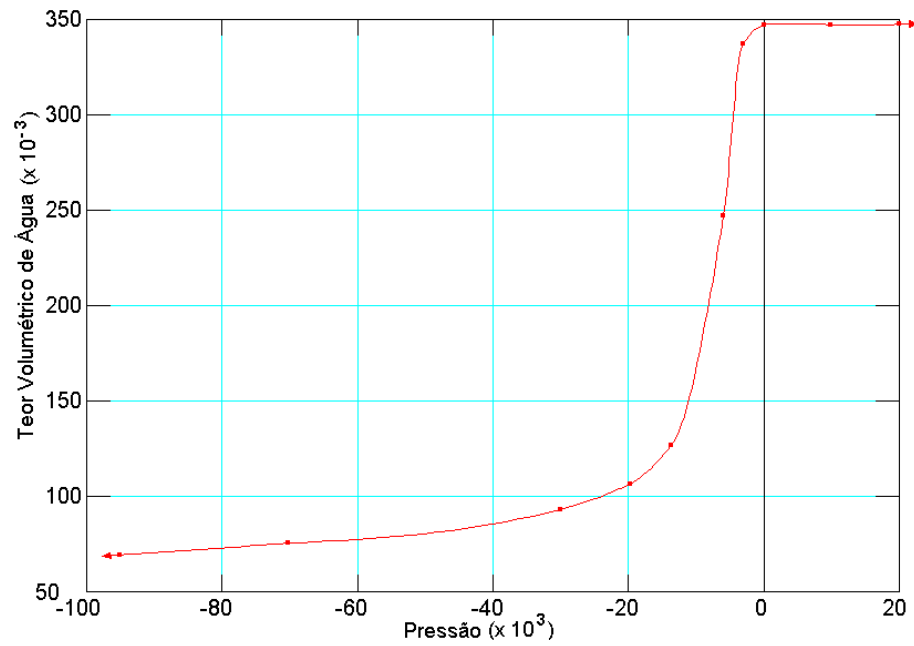


Gráfico 6.18 Função teor volumétrico de água versus pressão referente ao Solo 3

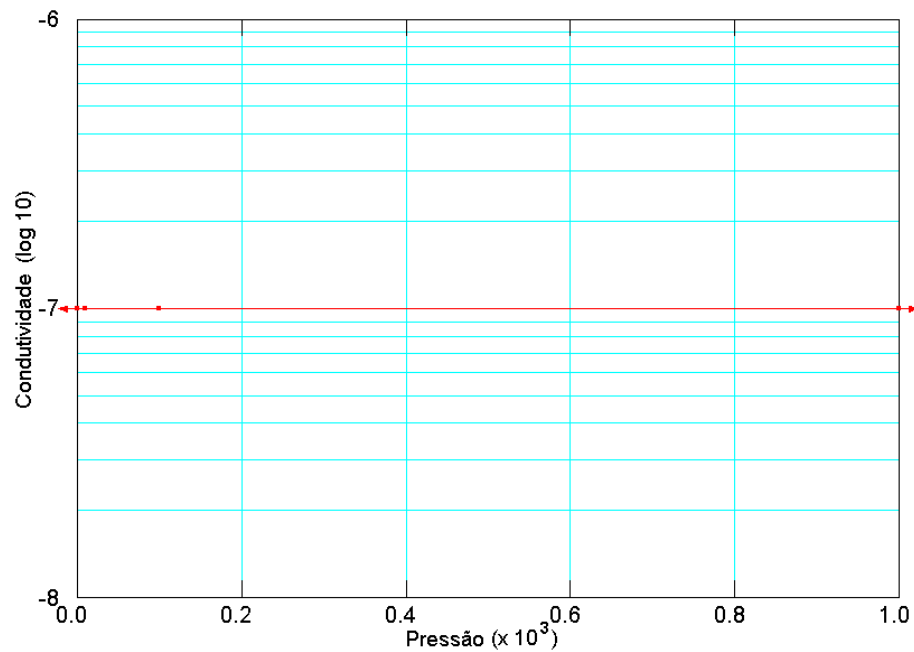


Gráfico 6.19 Função de condutividade (m/s) versus pressão (kPa) referente ao Solo 4

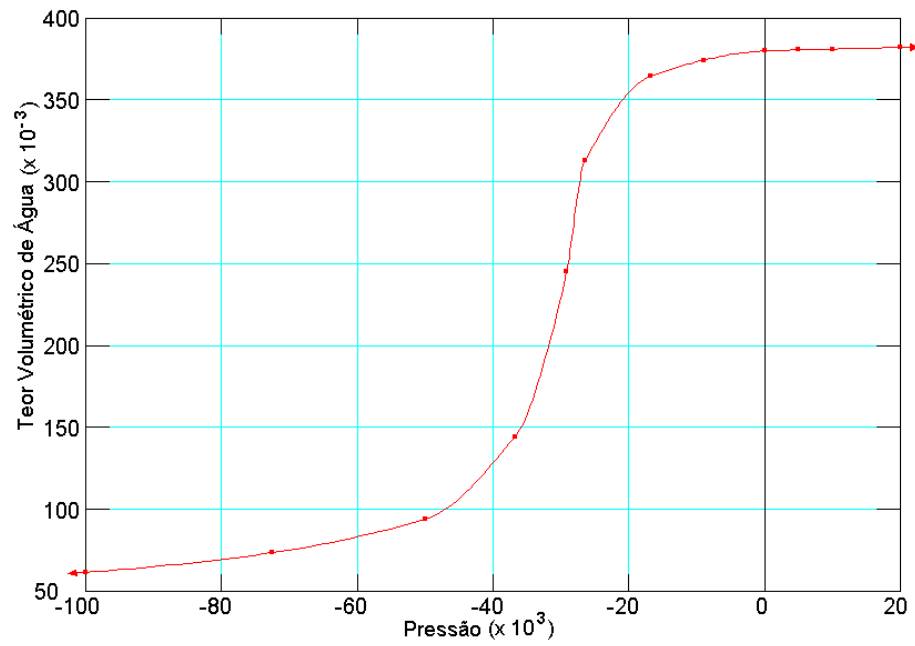


Gráfico 6.20 Função teor volumétrico de água versus pressão referente ao Solo 4

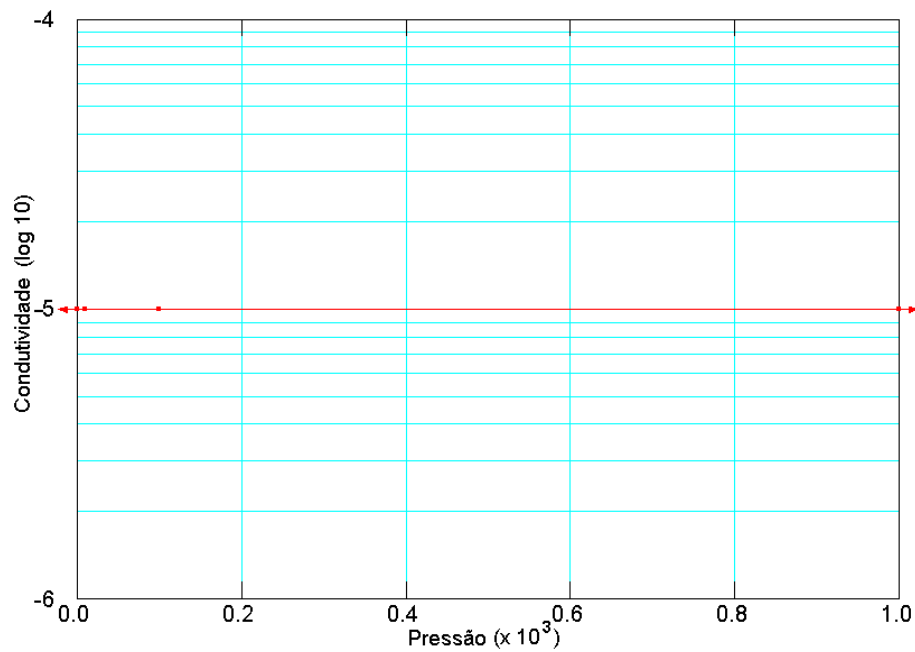


Gráfico 6.21 Função de condutividade (m/s) versus pressão (kPa) referente ao Solo 5

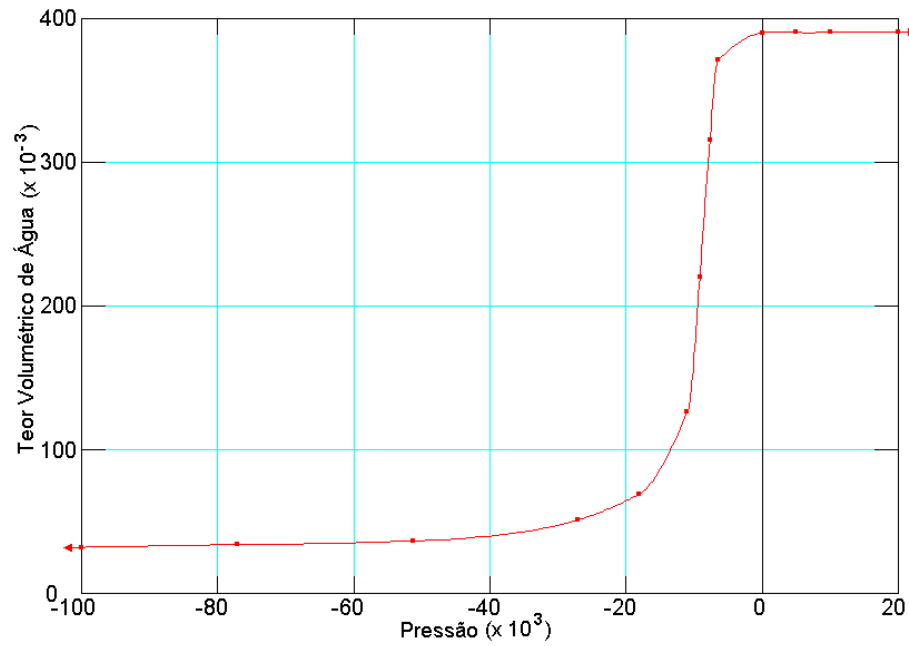


Gráfico 6.22 Função teor volumétrico de água versus pressão referente ao Solo 5

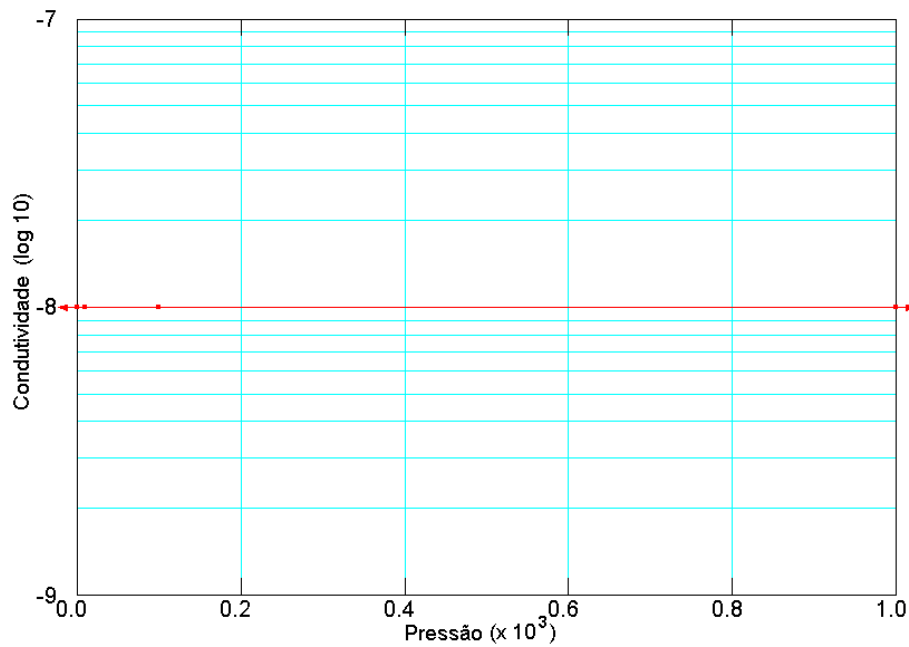


Gráfico 6.23 Função de condutividade (m/s) versus pressão (kPa) referente ao Solo 6

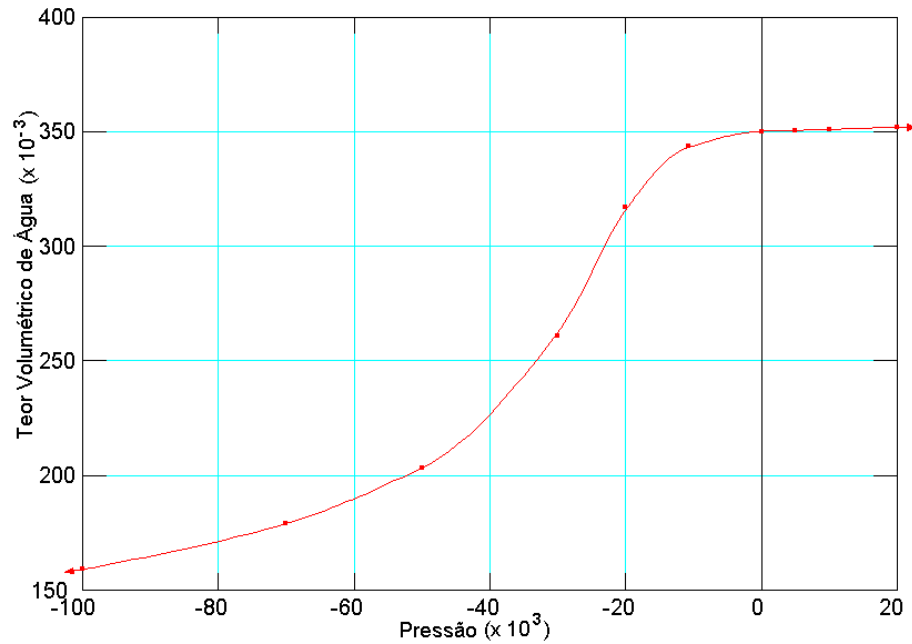


Gráfico 6.24 Função teor volumétrico de água versus pressão referente ao Solo 6

6.1.3 Simulação da Análise de Fluxo

A análise de fluxo foi realizada para os níveis da lagoa nos mês de janeiro de 2006 e após o rompimento da estrada (barragem), no mês de março de 2006.

As Figuras 6.4 e 6.5 mostram as isocurvas de carga total das condições de janeiro de março, respectivamente.

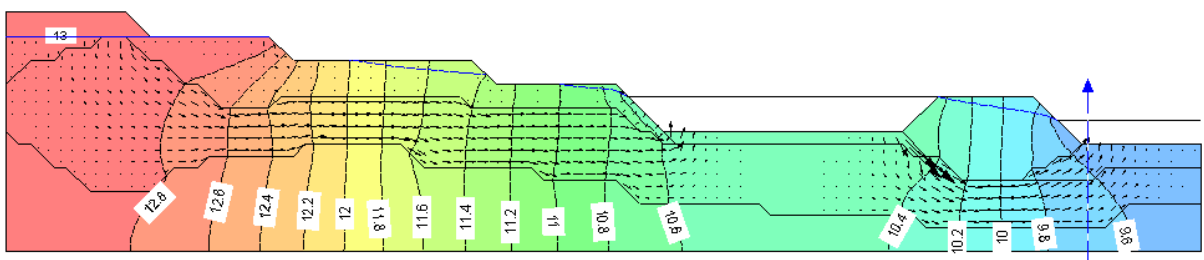


Figura 6.4 Isocurva de Carga Total (m) para o mês de janeiro de 2006

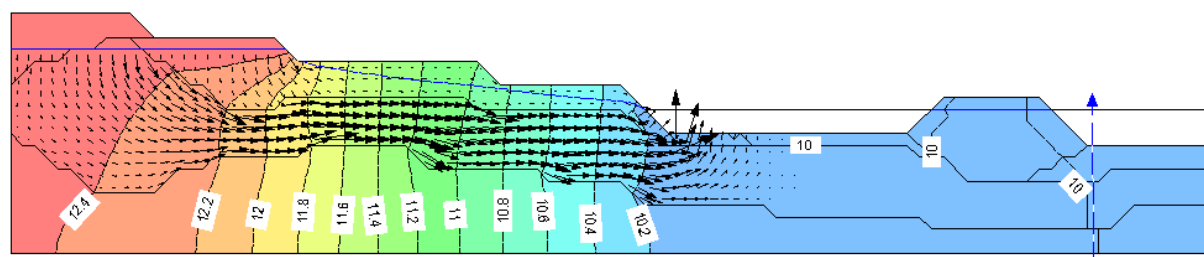


Figura 6.4 Isocurva de Carga Total (m) para o mês de março de 2006

As Figuras 6.6 e 6.7 mostram as isocurvas de carga de pressão das condições de janeiro de março, respectivamente.

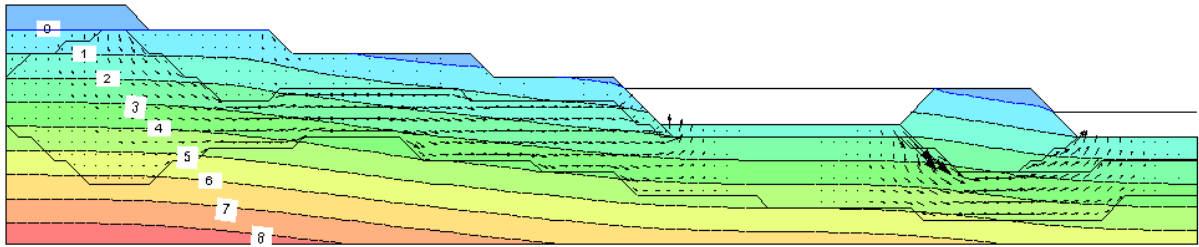


Figura 6.6 Isocurva de Carga de Pressão (m) para o mês de janeiro de 2006

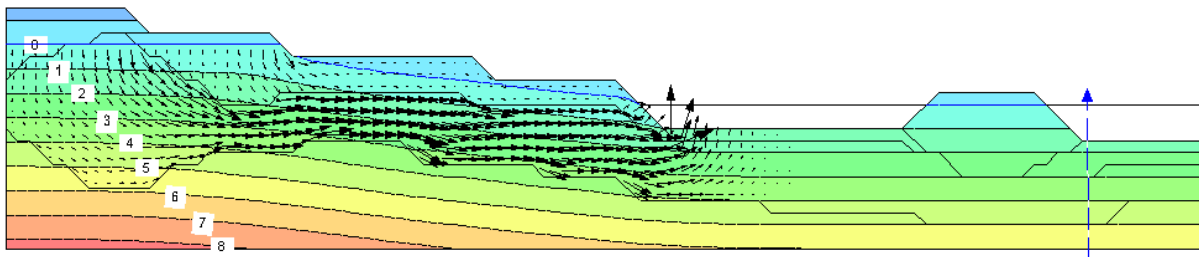


Figura 6.7 Isocurva de Carga de Pressão (m) para o mês de março de 2006

As Figuras 6.8 e 6.9 mostram as isocurvas de velocidade de percolação na direção XY das condições de janeiro de março, respectivamente.

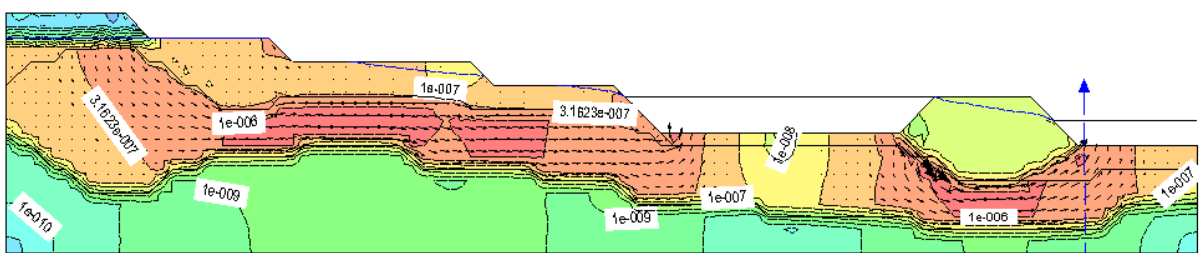


Figura 6.8 Isocurva de Velocidade XY (m/s) para o mês de janeiro de 2006

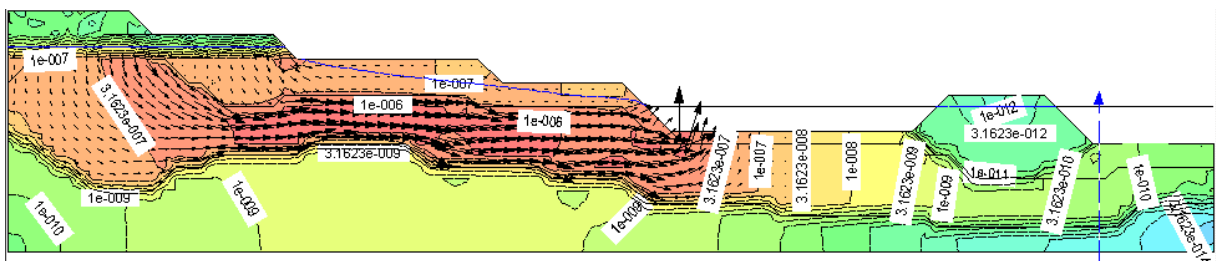


Figura 6.9 Isocurva de Velocidade XY (m/s) para o mês de março de 2006

Como era de se esperar a camada de areia existente na área mais baixa da ADRSU é uma trajetória de fuga de possíveis contaminantes. A camada de argila silto-arenosa funciona como uma barreira natural.

As Figuras 6.10 e 6.11 apresentam os valores de vazão encontrados nas simulações de fluxo.

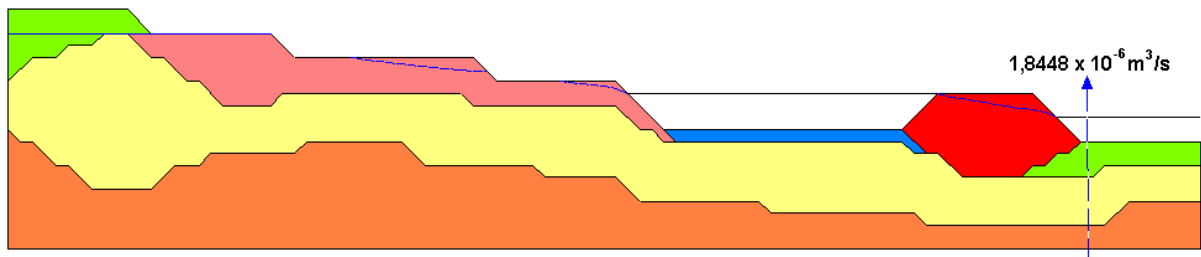


Figura 6.10 Vazão encontrada na simulação de fluxo para a condição de janeiro de 2006

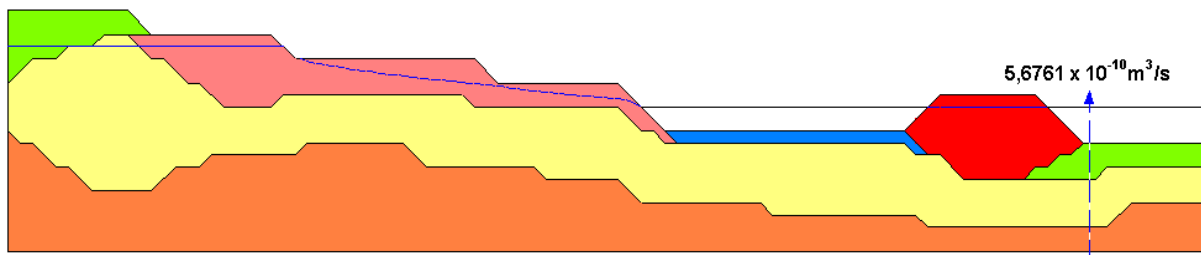


Figura 6.11 Vazão encontrada na simulação de fluxo para a condição de março de 2006

Identificou-se que para a condição de janeiro/2006, a vazão do fluxo subterrâneo na seção a jusante da estrada encontra-se na ordem de 10^{-6} , sendo 4 ordens de grandeza maior que a condição março/2006.

6.2 APLICATIVO CTRAN/W

6.2.1 Metais Pesados Analisados

Foram definidos os metais pesados Cobre (Cu) e Zinco (Zn) para análise do transporte de contaminantes na área de estudo. Para a escolha desses metais pesados, consideraram-se estudos sobre a análise quantitativa de concentração desses metais pesados realizados anteriormente na área de estudo (ALMEIDA et al.,2004; TIBANA et al.,2003; SANTOS JR.,2002 & ARARUNA et al.,2001), a presença no chorume desses íons dissolvidos (Tabela 2.2), a ordem de afinidade de sorção desses metais pesados no argilo-mineral caulinita (Tabela 2.4), a

identificação na região estudada de altos valores desses metais pesados (DRM/RJ,2001), além de considerar que os principais mecanismos de atenuação desses metais pesados são os mesmos e também por estes metais serem fortemente atenuados no meio argiloso (COELHO et al.,2003).

6.2.2 Parâmetros para Análise

Em alguns parâmetros, como não houve dados precisos para os materiais geológicos da área de estudo, consideraram-se valores calculados por meio de dados obtidos por meios empíricos e/ou da literatura (DA TRINDADE et al., 2006; GERMANO, 2001; MATOS, 1995 ; RITTER et al., 1995; DE CAMPOS & ELBACHÁ, 1991; ELBACHÁ, 1989; NOBRE, 1987 e PERKIN & JOHNSTON, 1963).

Concentração (C): A concentração na fonte (ADRSU) foi considerada percentualmente, ou seja, a concentração na fonte poluidora foi estimada como tendo 100% de concentração do contaminante.

Dispersividade Longitudinal (α_L): A estimativa do valor da dispersividade longitudinal é um assunto bastante controverso, principalmente a simulação de transporte envolvendo grandes áreas. Uma das considerações em voga é que a dispersividade longitudinal é diretamente dependente da escala (DOMENICO & SCHWARTZ, 1990). Com isso, quanto maior a escala do caso em estudo, maior deve ser o valor da dispersividade. Entretanto, essa consideração não foi ainda comprovada devido a grande incerteza associada às medidas de dispersividade em experimentos de larga escala. Análises desenvolvidas a partir de uma compilação de dados de dispersividade obtidos em experimentos de diferentes escalas mostram evidências que confirmam esta teoria, mas, por outro lado, a confiança associada aos experimentos é reduzida. Suspeita-se que a dispersividade obtida a partir dos dados de tais experimentos de maior escala seja superestimada devido a problemas relacionados a má definição da pluma, variações temporais do regime de fluxo, fontes mal caracterizadas, etc. Outra consideração sobre o assunto afirma que há uma dispersividade longitudinal assintótica para cada escala, sendo esses valores ligados por uma zona de transição na qual a dispersividade aumenta até se estabilizar novamente (COTA, CARVALHO FLO. & BRANCO, 2000).

Utilizou-se uma relação em que a dispersividade aumenta quando aumenta a distância entre a fonte e o ponto de observação, sendo a dispersividade longitudinal igual a 10% da distância percorrida. Esta expressão é conhecida como a regra do “um-décimo”, sendo recomendada pela EPA, para estimar dispersividades em estudos selecionados, onde não existem dados disponíveis (CLEARY, 1991). Assim, para uma seção estudada de aproximadamente 1 km, teremos uma dispersividade longitudinal de 100 metros.

Dispersividade Transversal (α_T): Recomenda-se utilizar valores de dispersividade transversal igual a uma a duas ordens de magnitudes menores da dispersividade longitudinal (COTA, CARVALHO FLO. & BRANCO, 2000). Utilizou-se a dispersividade transversal de 1 m, ou seja, duas ordens de magnitude menor da dispersividade longitudinal.

Discretização Temporal: A evolução das plumas de contaminantes foi simulada adotando um período de 5, 25, 50, 100 e 200 anos.

Tortuosidade (τ): Foram adotados, segundo dados da literatura, os valores de 0,4 para solos argilosos e 0,7 para solos arenosos, calculando-se o fator tortuosidade proporcionalmente para cada tipo solo, de acordo com sua porcentagem de areia e argila encontrada no ensaio de caracterização.

Coefficiente de Difusão Molecular em Solução Livre (D_0): Este parâmetro tem seus valores tabelados na literatura, conforme Quadro 2.6.

Coefficiente de Difusão Molecular Efetivo (D_e): O cálculo deste parâmetro se dá através do produto do fator tortuosidade pelo coeficiente de difusão em solução livre, conforme Equação 2.1.

Porosidade (η): A obtenção desse parâmetro foi dada pelo programa SEEP/W, que permite que valores de porosidade sejam obtidos em função da permeabilidade, uma vez que as amostras coletadas para os ensaios de caracterização foram amostras deformadas, não sendo possível a determinação do índice de vazios, e conseqüentemente da porosidade.

Peso Específico (γ_s): Parâmetro calculado a partir resultados dos ensaios de caracterização de solos e do parâmetro porosidade por (6.1).

$$\gamma_s = \delta \cdot \gamma_a (1 - \eta) \quad (6.1)$$

onde, δ a densidade real dos grãos, γ_a o peso específico da água e η a porosidade.

Coefficiente de Distribuição ou Partição água/solo (K_d): Parâmetro calculado através das isotermas de sorção, que são obtidas no ensaio de Equilíbrio de Lote. Uma vez que, durante este estudo não foi possível a realização deste ensaio, considerou-se valores de K_d obtidos da literatura (CETESB, 2001).

Fator de Retardamento (R_d): Este parâmetro é calculado pela Equação 2.2, que correlaciona os parâmetros de porosidade, peso específico e coeficiente de distribuição.

Apresenta-se no Quadro 6.5 os valores dos parâmetros utilizados nas simulações do CTRAN/W.

Quadro 6.5 Parâmetros utilizados nas simulações

SOLO		1	2	3	4	5	6
α_L (m)		100	100	100	100	100	100
α_T (m)		1	1	1	1	1	1
η (%)		34,7	39,0	34,7	38,0	39,0	35,0
γ_s 10^{-5} (g/m ³)		1,8284	1,6958	1,6390	1,6058	1,7019	1,8330
τ		0,55	0,45	0,70	0,59	0,61	0,52
R_d	Cu	1,0043	1,0038	1,0039	1,0037	1,0039	1,0043
	Zn	1,0020	1,0018	1,0018	1,0017	1,0018	1,0000
D_e 10^{-10} (m ² /s)	Cu	3,92	3,20	4,99	4,21	4,35	3,71
	Zn	3,86	3,16	4,91	4,14	4,28	3,65
K_d 10^{-4} (m ³ /g)	Cu	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
	Zn	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

6.2.3 Simulação do Transporte de Contaminantes

A análise qualitativa do transporte dos contaminantes Cobre e Zinco foi realizada para a condição de fluxo subterrâneo do mês de janeiro/2006, uma vez que essa é a condição predominante.

A pluma de contaminação de cada metal foi avaliada para um período de 200 anos.

Período de Exposição: 5 anos

As Figuras 6.12 e 6.13 mostram a evolução da pluma de contaminação do Cobre e do Zinco após 5 anos de exposição.

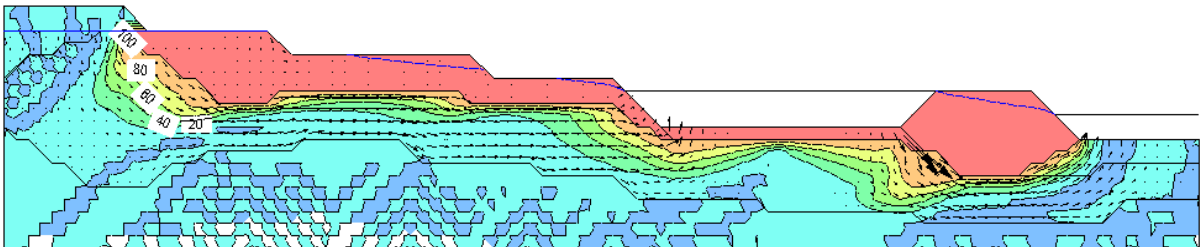


Figura 6.12 Pluma de contaminação do Cu após 5 anos de exposição

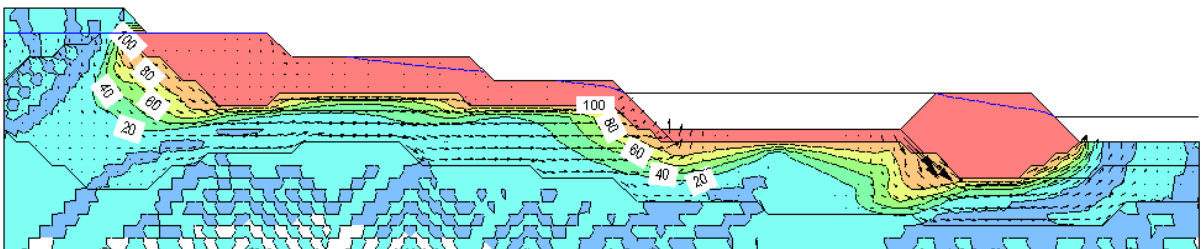


Figura 6.13 Pluma de contaminação do Zn após 5 anos de exposição

Período de Exposição: 25 anos

As Figuras 6.14 e 6.15 mostram a evolução da pluma de contaminação do Cobre e do Zinco após 25 anos de exposição.

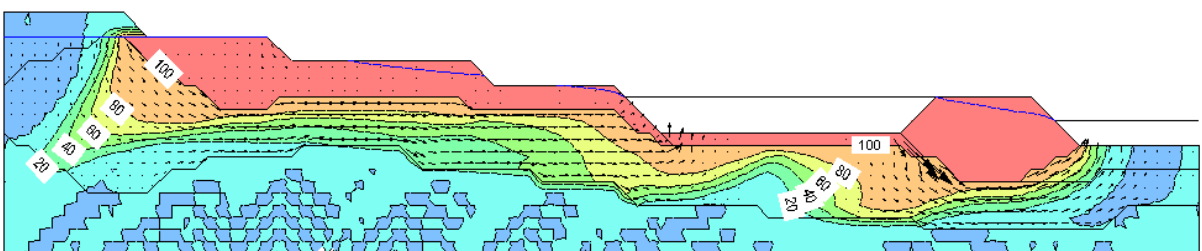


Figura 6.14 Pluma de contaminação do Cu após 25 anos de exposição

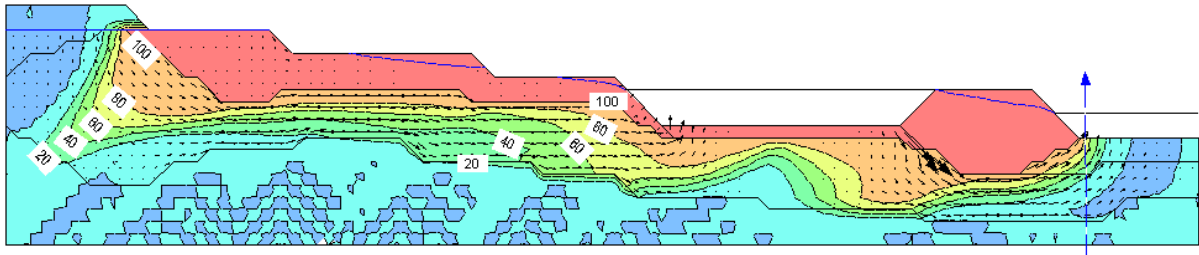


Figura 6.15 Pluma de contaminação do Zn após 25 anos de exposição

Período de Exposição: 50 anos

As Figuras 6.16 e 6.17 mostram a evolução da pluma de contaminação do Cobre e do Zinco após 50 anos de exposição.

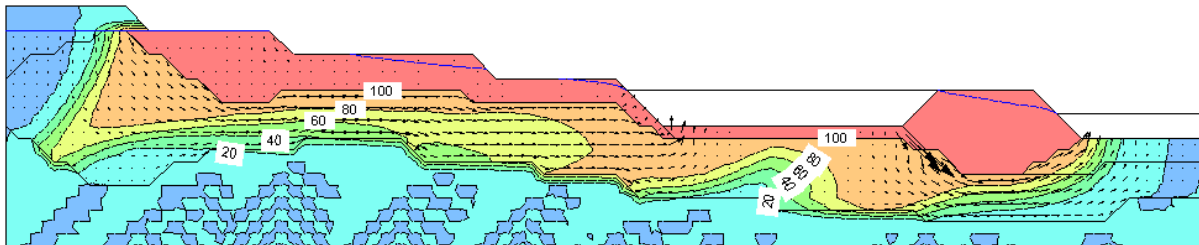


Figura 6.16 Pluma de contaminação do Cu após 50 anos de exposição

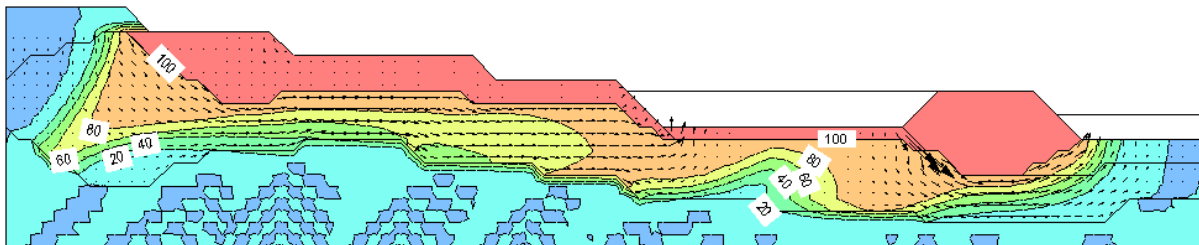


Figura 6.17 Pluma de contaminação do Zn após 50 anos de exposição

Período de Exposição: 100 anos

As Figuras 6.18 e 6.19 mostram a evolução da pluma de contaminação do Cobre e do Zinco após 100 anos de exposição.

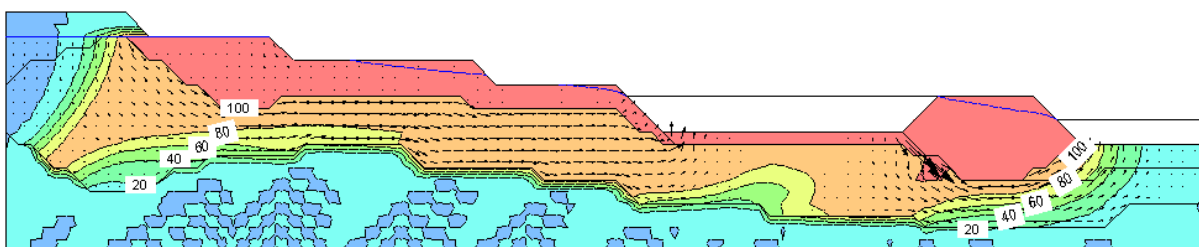


Figura 6.18 Pluma de contaminação do Cu após 100 anos de exposição

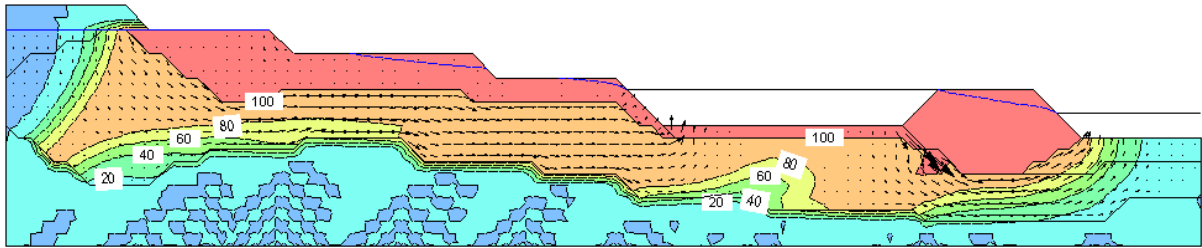


Figura 6.19 Pluma de contaminação do Zn após 100 anos de exposição

Período de Exposição: 200 anos

As Figuras 6.20 e 6.21 mostram a evolução da pluma de contaminação do Cobre e do Zinco após 200 anos de exposição.

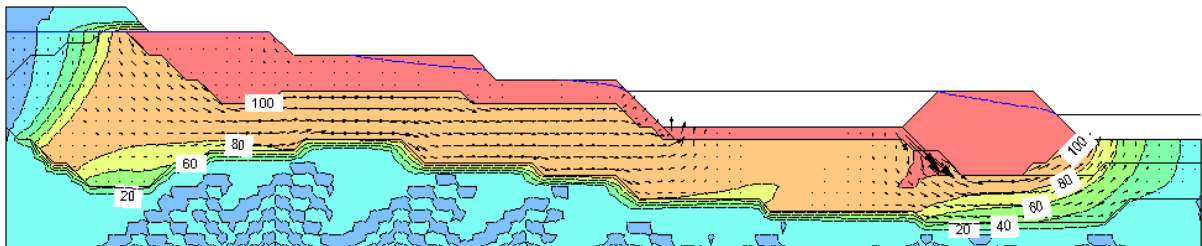


Figura 6.20 Pluma de contaminação do Cu após 200 anos de exposição

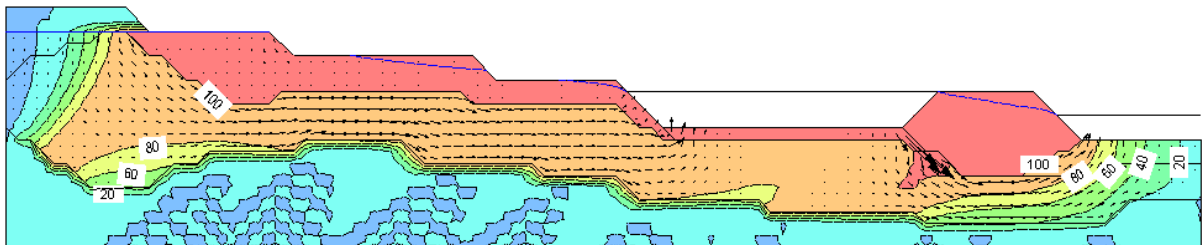


Figura 6.21 Pluma de contaminação do Zn após 200 anos de exposição

Combinando os resultados da análise de fluxo com a análise de transporte, verificou-se que a lagoa funciona como uma área de retenção dos contaminantes.

Verificou-se que os metais pesados possivelmente estejam sendo transportados, preferencialmente, por advecção através do fluxo horizontal da lente de areia.

Verificou-se também que as plumas de contaminação de ambos os metais pesados evoluem analogamente, provavelmente por terem os mesmos mecanismos de atenuação e serem fortemente atenuados em meio argiloso.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

As principais conclusões a que se pôde chegar com o desenvolvimento do presente trabalho são listadas a seguir.

- Análises físico-químicas do solo confirmaram que o solo da área de estudo é um latossolo caulínico, classificado com uma argila de alta plasticidade, com baixa atividade coloidal e de baixa permeabilidade.
 - O monitoramento dos níveis d'água (NA01, NA02 e NA03) confirmou os dados do DRM/RJ (2001), caracterizando o nível freático como subaflorante.
 - Os dados do levantamento planialtimétrico definindo o fluxo superficial como ocorrendo na direção oeste-leste é confirmado pelos dados do monitoramento dos limnímetros (LN01 e LN02).
 - Identificou-se, por meio do monitoramento das cargas piezométricas (PZ01, PZ102, PZ103, PZ104, PZ106 e PZ108), que o fluxo subterrâneo ocorre na direção oeste-leste, coincidindo com o fluxo superficial.
 - Comparando-se a execução de todos os ensaios de permeabilidade com carga variável realizados, verificou-se que os permeâmetros com diâmetro de 50 mm (PZ109, PZ110 e PZ111) possuem melhor operacionalidade, maior precisão das leituras e qualidade de execução.
 - Em relação aos teores de metais pesados encontrados, em termos gerais, os valores tenderam a aumentar com a profundidade, constatando que houve uma atenuação dos metais, provavelmente devido à característica argilosa do solo. A diminuição da condutividade hidráulica da camada de argila arenosa provavelmente pode ter sido causada pela obstrução dos poros por precipitação dos metais pesados, uma vez que este é um dos principais mecanismos de atenuação dos metais pesados Cu e Zn (PRIM, DE OLIVEIRA & CASTILHOS JR., 2003) e o pH ser ácido ($\text{pH} < 7$) (NOBRE, DE CAMPOS & DA FONTOURA, 1987).
-

- Observou-se através das análises químicas que os parâmetros que mais influenciaram a adsorção do metal pesado Cu foram o pH e a CTC, e no metal pesado Zn foram pH, CTC e quantidade de óxido de ferro.
- Os estudos de percolação apresentaram diferentes valores de vazão, sendo para a condição predominante (jan/2006) vazão na ordem de $10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.
- Em todas as simulações de transporte de contaminantes realizadas, verificou-se que o metal pesado Zn apresentou maior mobilidade pelo meio poroso quando comparado ao metal pesado Cu, causado possivelmente pela sua alta solubilidade e/ou pelo seu fator de retardamento ser menor com relação ao Cu. A maior mobilidade do Zn e a baixa solubilidade do Cu, justificam em parte os baixos valores de Cu obtidos através da análise geoquímica (item 5.2.1).
- Através da simulação de transporte dos contaminantes, verificou-se que os metais pesados estejam possivelmente sendo transportados através do fluxo horizontal da lente de areia, uma vez que a camada de argila arenosa é praticamente impermeável funcionando como uma barreira natural, confirmando as análises químicas dos solos e os resultados geofísicos obtidos por Monteiro (2002).

Fazem-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros, visando uma melhor da avaliação quali-quantitativa da contaminação tanto no compartimento solo quanto no compartimento água:

- Realizar o ensaio de coluna de lixiviação para os elementos químicos, para que os parâmetros de transporte de contaminante R_d e D_e sejam mais representativos.
 - Realizar monitoramento para determinação periódica do pH e da condutividade hidráulica, e coletar amostras de água na instrumentação, no mínimo em duas campanhas (uma no período de chuva e outra na estiagem), para análises químicas e bacteriológicas, a
-

fim de se verificar a confiabilidade dos resultados obtidos computacionalmente.

- Realizar sondagens mais profundas, com o objetivo de discretizar com melhor representatividade a camada de argila arenosa, classificada como praticamente impermeável, no intuito de coletar amostras indeformadas e deformadas para análise físico-química para verificação da hipótese de efeito tampão.
 - Realizar ensaios com traçadores fluorescentes de fluxo para definir a velocidade e a direção do fluxo subterrâneo com o objetivo de validar a simulação de fluxo realizada.
 - Realizar ensaios de análises químicas dos solos para os elementos químicos:
 - Cádmio (Cd) devido à identificação de teores muito acima dos limites preconizados pela Portaria 1469/00 do Ministério da Saúde (ALMEIDA et al.,2004).
 - Cromo (Cr) devido à identificação de traços deste metal na água muito acima dos limites preconizados pela Portaria 1469/00 do Ministério da Saúde (ALMEIDA et al.,2004), elevados teores no solo (SANTOS JR., 2002) devido ao lançamento indiscriminado no lixão dos resíduos de curtume, atividade em que se utiliza o Cr.
 - Chumbo (Pb) devido a presença de íons desse metal dissolvidos no chorume e teores elevados no solo (SANTOS JR., 2002).
 - Realizar simulação computacional em 3D, para melhor representatividade com intuito de uma avaliação mais precisa da pluma de contaminação na área estudada.
-

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, A.; DE CASTRO, J.A. & DA SILVA, J. Simulação e Determinação dos Parâmetros da Cinética de Transferência de íons do Choro para o Solo. In: XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Curitiba, 2006. XIII COBRAMSEG. Curitiba, 2006

ARARUNA JR., J; TIBANA, S.; MONTEIRO, L.A.C. & SANTOS JR. Heavy Metal Contaminations in a Municipal Dumping Site in Southeast Brazil. In: Proceedings of XVII International Conference on Solid Waste Technology Management. Philadelphia, EUA, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5734: *Peneiras para ensaio – especificação*. Rio de Janeiro, 1984

__. NBR 6457: *solo: determinação da umidade natural*. Rio de Janeiro, 1984.

__. NBR 6459: *solo: determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 1984.

__. NBR 6508: *solo: grãos de solo que passam na peneira de 4,8 MM: determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 1982.

__. NBR 7180: *solo: determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 1984.

__. NBR 7181: *Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 1984.

__. NBR 7250: *identificação e descrição de amostras de solos obtidos em sondagem de simples reconhecimento*. Rio de Janeiro, 1980.

__. NBR 9603: *sondagem a trado*. Rio de Janeiro, 1986.

ALMEIDA, F.T.; Campos, F.S.; SANTOS JR., E.L.; TIBANA, S.; ROSA, C.C.B. *Avaliação Preliminar da qualidade da água em torno da área de disposição dos resíduos sólidos urbanos (ADRSU) da cidade de Campos dos Goytacazes – RJ*. Campos dos Goytacazes, RJ, 2004

BENSON, C.H.; GUNTER, J.A.; BUTWELL, G.P.; TRAUTWEIN, S.J. & BERZANSKIS, P.H. *Comparison of Four Methods to Assess Hydraulic Conductivity*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 123 no. 10, Outubro, 1997.

BIDEGAIN,P.; BIZERRIL; SOFFIATI, A. Lagoas do Norte Fluminense – Perfil Ambiental. Rio de Janeiro, 2002.

CASAGRANDE, A. *Classification and Identification of Soils*. 1948. Trans. ACE> Vol. 113 p. 901.

CASTILHOS JR, A.B.; MEDEIROS, P.A.M.; FIRTA, I.N.; LUPATINI, G.; DA SILVA, J.D. Principais Processos de Degradação de Resíduos Sólidos Urbanos. In: Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte, 2003.

CLEARY, R.W. *Qualidade da Água Subterrânea. In: Hidrologia Ambiental. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH. São Paulo, 1991.*

COELHO, H.M.G., SIMÕES, F.G., LANGE, L.C., FERREIRA, C.F.A. *Estudo Preliminar da Contaminação por Metais Pesados na Área do Aterro de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Catas Altas – MG. 2003a In: REGEO 2003.*

COELHO, H.M.G., SIMÕES, F.G., LANGE, L.C., FERREIRA, C.F.A. *Estudo do Transporte de Contaminantes em Meios Porosos Aplicado a Aterros de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos. In: Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte, 2003b.*

COTA, S.D.S.; CARVALHO FLO, & BRANCO, O.E.A. *Modelagem Matemática do Transporte de Contaminantes na Bacia Hidrogeológica Experimental do Córrego do Engenho Nogueira – Belo Horizonte/MG. Belo Horizonte, 2002.*

DA FONTOURA, S.A.B.; DE CAMPOS, T.M.P. & NOBRE, M.M. *Migração de Poluentes através de Meios Porosos . Painel: Características Geotécnicas, Métodos de Análise e Critérios de Projeto – REGEO/1987.*

DA TRINDADE, T.P.; DE LIMA, D.C.; FONTES, M.P.F.; MACHADO; SCHAEFER, C.E.G.R., DE CARVALHO, C.A.B. *Adsorção/Precipitação dos Metais Pesados Cd e Cu em Solo Residual Maduro de Gnaisse, em função da variação do pH. In: XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Curitiba, 2006.*

DE CAMPOS, T.M.P. & ELBACHÁ, A.T. *Avaliação do Fator de Retardamento por Adsorção no Transporte de Zinco em Solos Argilosos. In: Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de resíduos. REGEO' 91. Rio de Janeiro, 1991*

DEGROOT, D.J. & LUTERNEGGER, A. J. *A Comparison Between Field and Laboratory Measurements of Hydraulic Conductivity in a Varved Clay. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1993.*

DOMENICO, P.A.; SCHWARTZ, F.W. *Physical and Chemical Hidrogeology. New York, 1990.*

DEPARTAMENTO DE RECURSOS MINERAIS/ RJ – DRM/RJ. *Programa Levantamento Geológico Básico do Brasil. Geologia do Estado do Rio de Janeiro. Brasília, 2001*

ELBACHÁ, A. T. *Estudo da influência de alguns parâmetros no transporte de massa em solos argilosos. 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro.*

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. *Manual de Métodos de Análise de Solo. Rio de Janeiro, 1997.*

FANTINATTI NT., F.P.; TIBANA, S.; ALMEIDA, F.T.; SANTOS JR., E.L.; PESSANHA, A.O.S.; VICENTE, N.O. & CAMPOS, F.S. *Estudo da Dinâmica de*

Fluxo Subterrâneo da Área de Disposição Final de Resíduos da Cidade de Campos dos Goytacazes/RJ. In: XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Curitiba, 2006.

FANTINATTI, P.H.A.; FANTINATTI NT. , F.P., TIBANA, S. ALMEIDA, F.T. *Ensaio de Permeabilidade In Situ em Solos Saturados*. In: II GeoJovem, Nova Friburgo, 2006.

FEITOSA, F. A. C., MANOEL FLO, J. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 2ª edição, 2000.

FREEZE, R.A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1979.

GERSCOVICH, D.M.S; de CAMPOS, T.M.P. *Fluxo Bidimensional em Solos Saturados*. Departamento de Engenharia Civil - PUC/RJ. 1986

GERMANO, A. M. *Estudo Numérico do Transporte de Metais Pesados na área do Lixão do Município de Viçosa-MG* . Tese de Mestrado. Viçosa, 2001.

GEO-SLOPE, *CTRAN/W for element contaminant transport analysis*. Versão 4, 1998.

GEO-SLOPE, *SEEP/W for infinite element seepage analysis*. Versão 4, 1998.

HVROSLEV, M. J. *Time lag in the observation of ground-water levels and pressures*, U.S Army Water-ways Experiment Station, Vicksburg, Miss. 1949

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL – IBAM . *Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos*. Rio de Janeiro, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Censo Demográfico*. Rio de Janeiro, 2000a.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*. Rio de Janeiro, 2000b. CD-ROM

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Superintendência Geodésica*. Rio de Janeiro, 1965.

KIEHL, E.J.; NAUMOFF, A.; PERES , C.S.; TEIXEIRA JR., P.B. & SILVEIRA, P.B.M. *Reciclagem da Matéria Orgânica* In: Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte, 2003.

LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V. *Mecânica de Suelos* – Editorial Limusa.

LIMA, L.M.Q. *Lixo: tratamento e biorremediação*. Ed. Hemus Editora Ltda. 3ª edição. São Paulo, 1995.

MACHADO, S.L.; RIBEIRO, L.D.; KIPERSTOK, A.; BOTELHO, M.A.B. & CARVALHO, M.F. *Diagnóstico da Contaminação por Metais Pesados em Santo Amaro-BA* . In: Engenharia Ambiental vol.9 no.2 abr/jun. 2004

MAHLER, C.F. & AGUIAR, A.B. *Determinação da Permeabilidade In Situ em Aterros de Resíduos Sólidos* In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental . ABES,2002.

MATTOS. *Fatores de Retardamento e Coeficiente de Dispersão-Difusão do Zn, Cd, Cu e Pb em Solos do Município de Viçosa/MG*. Dissertação de Mestrado. Viçosa, 1995.

MELO, V.L.A., *Estudos de referência para diagnóstico ambiental em aterros de resíduos sólidos*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, 2000.

MONTEIRO, L.C. *Estudo da Contaminação da área de disposição de resíduos sólidos da cidade de Campos dos Goytacazes – RJ pela técnica eletromagnética*. Campos dos Goytacazes, RJ. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2002.

MONTEIRO, V.E.D. *Análises físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento do aterro da Muribeca*. Dissertação de Mestrado, UFPE, Recife,PE. (2003)

MONTEIRO, V.E.D., JUCÁ, J.F.T. *Gestão Ambiental no processo de recuperação da área do aterro de resíduos sólidos da Muribeca – PE*. Recife – PE. (2000)

NOBRE, M.M.M. *Estudo experimental do transporte de poluentes compactados*. Rio de Janeiro, RJ. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica, 1987.

NOBRE, M.M.M.; DE CAMPOS, T.M.P. & DA FONTOURA, S.A.B. *Considerações Sobre o Efeito Tampão de Poluentes em Solos Argilosos*. In: Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração. REGEO'95. Ouro Preto, 1995.

OLSON, R.E.; DANIEL. *Measurements of the Hydraulics Conductivity of Fine-Grained Soils*. Permeability and Groundwater Contaminante Transport, ASTM STP 746,TF. Zimmie and C.O. Riggs, Edds. American Society for Testing and Material, 1981.

PERKINS, T. K.; JOHNSTON, O. C. *A review of diffusion and dispersion in porous media*. Society of Petroleum Engineering Journal, v. 3, 1963.

PINTO, C. S. *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas*. São Paulo: [s.n.], 2000. (Oficina de textos).

PINTO, N. L. S., *Hidrologia básica*. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1976.

PORTO, R; BRANCO, S M.; CLEARY , R ; COIMBRA, R; EIGER, S; DE LUCA, S; NOGUEIRA, V; PORTO,M *Hidrologia Ambiental*. Vol 3 - Ed. USP.

PRIM, E.C.C.; DE OLIVEIRA, J.C. & CASTILHOS JR, A.B. *Comportamento dos Solos Argilosos como Impermeabilizantes em Aterros Sanitários diante da*

Atenuação de Contaminantes. In: Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte, 2003.

PROJETO DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM DA CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO NORTE FLUMINENSE – PROJIR . Instituto do Açúcar e do Alcool. 1992

REDDI, L.N.; INYANG, H.I. *Geoenvironmental Engineering: Principles and Applications*. Marcel Dekker, 2000.

RITTER, E.; EHRlich, M; BARBOSA, M.C; *A Difusão Molecular no Transporte de Contaminantes através dos Solos*. IN: Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos. REGEO' 95. Ouro Preto, 1995.

RIGHETTO, A. M. *Hidrologia e recursos hídricos*. São Carlos: EESC-USP, 1998.

SANTOS Jr, E.L. *Avaliação da Contaminação do Solo por metais pesados da área de disposição final da cidade de Campos dos Goytacazes – RJ*. Campos dos Goytacazes, RJ, 2002, 141p. Dissertação de Mestrado – UENF/RJ.

SANTOS JR, E.L. ; TIBANA, S.; DE SOUZA, C.M.M. & MONTEIRO, L.A.C. Heavy Metal Contamination in the Dumping Site of Campos dos Goytacazes-RJ/Brazil. In: Proceedings of the 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Boston, 2002.

SIMÕES, G.F., LANGE, L.C., FERREIRA, C.F.A., GOULART COELHO, H.M., GARCIA, L.N., SANTANA, D.W.E.A. *Monitoramento ambiental e geotécnico de um aterro de disposição de resíduos sólidos de uma pequena comunidade. Estudo de caso do município de Catas Altas – MG*.

SKEMPTON, A.W. *The coloidal Activity of Clays*. Proc. 3rd Inter. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Zurich, 1953

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. *Integrated solid waste management: engineering principles and management issues*. [s.l.]: Mc Graw-Hill, 1993.

TIBANA, S.; SANTOS Jr., E. L.; MONTEIRO, L. A. C. *Identificação do Regime de Fluxo Sub-superficial da Área de Disposição de Resíduos Sólidos da Cidade de Campos dos Goytacazes – RJ*.

UENF – PESAGRO. *Estação Evapotranspirométrica*. Convênio UENF – PESAGRO . 2007 .

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Basic concepts of contaminant sorption at hazardous waste sites*. Washington, U.S., 1999. (Technical Resource Document, EPA/540/4-90/053).

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Behavior of Metals in Soils*. Washington, U.S., 1999. (Technical Resource Document, EPA/540/S-92/018).

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Ground water sampling for metals analysis*. Washington, U.S., 1999. (Technical Resource Document, EPA/540/4-89/001).

VERRUIJT, A. *Groundwater Flow*. 2. ed. London: The Macmillan, 1982.

VIEIRA, E.M.; DE ALMEIDA, F.T.; TIBANA, S. & SANTOS JR, E.L. *Avaliação do Processo de Contaminação do Solo em Uma Microbacia no Noroeste do Estado do Rio de Janeiro*. In: XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Curitiba, 2006.

WANIELISTA, M.; KERSTEN, R.; EAGLIN, R. *Hydrology: water quantity and quality control*. [s.l.]: John Wiley & Sons, 1997.