

## INVESTIGAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DOS SOLOS DE UMA ÁREA DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS POR MEIO DE ENSAIOS DE CAMPO E LABORATÓRIO

*INVESTIGATION OF THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SOILS IN AN AREA OF MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILL THROUGH FIELD AND LABORATORY TESTS*

Lucas Scarpanti de Jesus<sup>1</sup>, Jeferson Brito Fernandes<sup>2</sup>, Heraldo Luiz Giacheti<sup>3</sup>

Universidade Estadual Paulista Faculdade de Engenharia de Bauru, Depto. de Engenharia Civil  
Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube 14-01

CEP: 17033-360 Bauru, SP, Brasil.

Email: <sup>1</sup>lucas.scarpanti@gmail.com, <sup>2</sup>ra811882@feb.unesp.br, <sup>3</sup>giacheti@feb.unesp.br

### RESUMO

Uma pluma de contaminação devido à infiltração de lixiviado foi encontrada no aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru, SP. A condutividade hidráulica (K) do solo é um importante parâmetro para compreender a movimentação dessa pluma. Este artigo visa apresentar valores representativos de K determinados em ensaios de campo e laboratório para os solos que ocorrem nesse aterro. Há quatro tipos de solos na área, colúvio, aluvião, residual de arenito e arenito. Em laboratório foram realizados ensaios em permeâmetros de parede flexível e de parede rígida, a carga constante e variável. No campo realizaram-se ensaios de recuperação em poços de monitoramento e ensaios de condutividade hidráulica com o permeâmetro de Guelph. Como representativos, para o solo residual, encontraram-se valores de K de  $3,7 \times 10^{-7}$  m/s na zona saturada e de  $2,4 \times 10^{-7}$  m/s para a zona não saturada. No solo colúvio obteve-se um valor de K de  $5,3 \times 10^{-5}$  m/s. Foi encontrada, no aluvião, grande variação de K com a profundidade, assumindo um valor médio de  $7,9 \times 10^{-7}$  m/s para a zona saturada e de  $1,1 \times 10^{-4}$  m/s para a camada superficial não saturada. Um valor médio de  $3,3 \times 10^{-8}$  m/s foi determinado no laboratório para o arenito, o qual foi considerado representativo para esse material.

**Palavras-Chave:** investigação geoambiental, condutividade hidráulica, aterro de resíduos sólidos, solos tropicais.

### ABSTRACT

A contaminant plume due to leachate infiltration was found in the solid waste landfill from Bauru, SP. The soil hydraulic conductivity (K) is an important parameter to understand the moving of this plume. This paper intends to show representative K values for the soils that occur in the vicinity of this landfill determined by field and laboratory tests. There are four soil types in the area: colluvium, alluvium, sandstone residual soil and the sandstone. Laboratory tests were performed using constant and variable head in rigid and flexible wall permeameters. Slug tests and hydraulic conductivity tests with the Guelph permeameter were also carried out in situ in the area. Representative K values of  $3.7 \times 10^{-7}$  m/s for the saturated zone and  $2.4 \times 10^{-7}$  m/s for the unsaturated zone were determined for the residual soil. A K value of  $5.3 \times 10^{-5}$  m/s was obtained for the colluvium soil. A great variation of K with depth was observed for the alluvium and the assumed average values for the saturated zone were  $7.9 \times 10^{-7}$  m/s and  $1.1 \times 10^{-4}$  m/s for the unsaturated surficial layer. An average K value of  $3.3 \times 10^{-8}$  m/s was determined in laboratory for the sandstone and it was assumed representative for this material.

**Keywords:** geo-environmental investigation, hydraulic conductivity, solid waste landfill, tropical soils.

## 1 – INTRODUÇÃO

Para a compreensão das condições de fluxo de um aquífero, bem como da velocidade de propagação de uma pluma de contaminação, tem-se a condutividade hidráulica do solo (K) como um importante parâmetro de análise.

Na área de estudo, o Aterro de Resíduos Sólidos de Bauru, SP, pesquisas anteriores indicaram a existência de contaminação devido à infiltração de lixiviado e sugerem alguns valores de K para os solos que ocorrem na área, entretanto, ainda não é possível determinar um conjunto de valores representativos para cada tipo de solo que ocorre na área, de grande heterogeneidade, com processo de evolução tropical.

Este trabalho tem como objetivo apresentar valores representativos de condutividade hidráulica para os solos que ocorrem na área por meio da execução e interpretação de resultados de ensaios em campo e laboratório utilizando

diferentes técnicas. Deste modo, auxiliar no melhor entendimento das condições de fluxo subsuperficial e da tendência de movimentação da pluma de contaminação.

## 2 – ÁREA DE ESTUDO

O aterro de resíduos sólidos de Bauru/SP possui uma área de 268985 m<sup>2</sup>, e localiza-se nas coordenadas 22°15'25"S e 49°08'15"W.

De acordo com EMDURB (2012), o aterro recebe cerca de 220 a 250 t/dia de resíduos sólidos e até 2008, 1,8 t/dia de resíduos de serviços de saúde eram dispostos em valas sépticas ao redor do aterro. A operação do aterro é realizada precariamente, cobrindo-se o lixo com uma camada de solo escavado da própria área, não havendo um controle adequado da extensão da frente de operação. Praticamente não há sistema de drenagem de lixiviado e a execução da impermeabilização de base foi realizada

apenas com aplicação de emulsão asfáltica diretamente sobre sua fundação. Nestas condições de operação o aterro pode ser considerado como controlado, entretanto a cobertura dos resíduos não é realizada constantemente ao longo do tempo, assim este alterna entre condições controlada e condições características de um lixão a céu aberto, assim, não se pode adotar uma classificação explícita para o local.

A área possui grande heterogeneidade, com ocorrência de solos de diferentes tipos, que podem ser classificados quanto a sua formação em quatro tipos: coluvião, residual

de arenito, arenito e aluvião. Mondelli (2008) definiu para a área um modelo conceitual do perfil dos horizontes de solo o qual é mostrado na Figura 1. As siglas PP, CPTU, SPT e RCPTU indicam as sondagens geológico-geotécnicas utilizadas para a definição deste modelo, as quais se referem, respectivamente, à instalação de poços de monitoramento, ensaios de piezocone, ensaios de penetração padrão e ensaios de piezocone com medida de resistividade elétrica.

Legenda:

Figura 1 – Perfil Geológico Geotécnico do Aterro de Resíduos Sólidos de Bauru no sentido Leste – Oeste (modificado de MONDELLI, 2008)

### 3 – METODOLOGIA

A caracterização geotécnica dos solos da área foi feita por meio de ensaios de granulometria (ABNT NBR 7181/88), limites de Atterberg (ABNT NBR 7180/84 e NBR 6459/84) e adsorção de azul de metileno (PEJON, 1992). A determinação da condutividade hidráulica foi feita tanto no campo como em laboratório. Os resultados serão interpretados a partir de uma análise crítica dos resultados

dos ensaios, buscando estabelecer valores médios que representem o comportamento de cada tipo de solo que ocorre na área.

A Figura 2 mostra a localização dos pontos onde foram realizados os ensaios de campo e a coleta de amostras deformadas e indeformadas para a realização de ensaios de laboratório. A distribuição da amostragem e dos ensaios de campo foi dada para atingir os quatro tipos de solo de ocorrência na área.

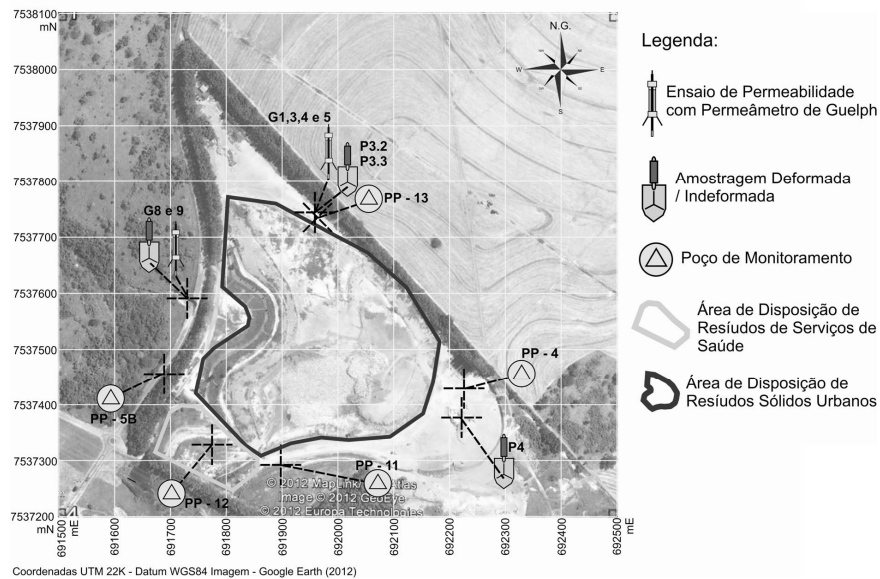


Figura 2 – Localização das amostragens e ensaios de campo realizados

### 3.1 – Ensaios de condutividade hidráulica em laboratório

No laboratório foram conduzidos ensaios de condutividade hidráulica em permeâmetros de parede rígida e de parede flexível. Os ensaios nos permeâmetros de parede rígida foram realizados segundo as normas brasileiras ABNT NBR 13292/95 e ABNT NBR 14545/2000 a carga hidráulica constante e variável, respectivamente.

Para os ensaios em permeâmetros de parede rígida foram utilizadas duas configurações de montagem distintas, uma utilizando-se de um permeâmetro confeccionado em aço e outra em plástico tipo PVC. A Figura 3 e a Figura 4 mostram o esquema das montagens utilizadas. Na montagem dos permeâmetros em PVC o cilindro da câmara foi cravado cuidadosamente na amostra indeferomada para que o corpo de prova ficasse no seu interior.

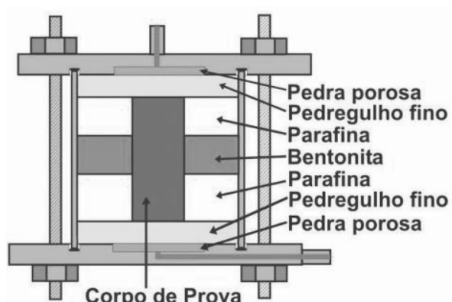


Figura 3 – Esquema de montagem dos permeâmetros de parede rígida em aço.

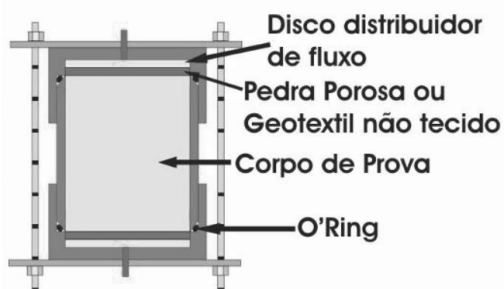


Figura 4 – Esquema de montagem dos permeâmetros de parede rígida em PVC

Os ensaios em permeâmetros de parede flexível foram conduzidos segundo a norma ASTM D5084-03. Para tais ensaios foi utilizado o sistema de controle ilustrado na Figura 5, para possibilitar a aplicação de pressão confinante e da poro-pressão.

O permeâmetro de parede flexível é basicamente constituído de uma câmara de pressão onde um corpo de prova de solo é instalado revestido por uma membrana de borracha impermeável. Esta câmara é preenchida totalmente com água e inicialmente é realizada a percolação de água pelo corpo de prova com pressão atmosférica no interior da câmara sob carga hidráulica constante, após a verificação da existência de gotejamento na saída do sistema, a percolação é interrompida e a partir daí o processo de saturação por contra pressão começa. Esse processo consiste na aplicação de um pequeno incremento de pressão externa ao corpo de prova (pressão confinante) sucedido de um incremento igual na pressão

interna ao corpo de prova (poro-pressão / contra-pressão) mantendo a diferença entre as pressões (tensão efetiva no corpo de prova) constante. Realizando-se sucessivos incrementos de pressão externa e interna, o ar contido no corpo de prova é dissolvido na água devido ao aumento da pressão. Quando o corpo de prova chega à saturação, uma vez que não há mais ar no corpo de prova que possa ser comprimido, e como o fluxo de água esta interrompido, um incremento de pressão confinante gera um incremento igual na poro-pressão. Este efeito é medido pelo parâmetro B, que é igual ao incremento de poro-pressão ocorrido dividido pelo incremento de pressão confinante imposto. Durante os sucessivos incrementos de pressão esse parâmetro é medido, considerando-se o corpo de prova saturado quando B atinge ou ultrapassa 0,95.

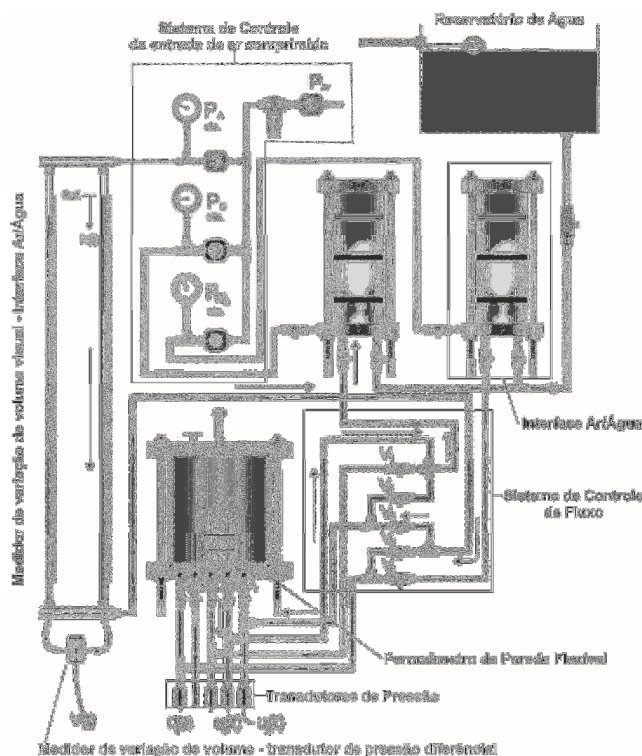


Figura 5 – Sistema de controle hidráulico utilizado para a realização de ensaios em permeâmetro de parede flexível (as setas indicam a direção do fluxo de água durante a realização do ensaio)

Após a saturação é realizada a percolação de água pelo interior do corpo de prova por meio da imposição de uma carga hidráulica no topo deste, a qual pode ser constante com relação a poro-pressão (pressão na base do corpo de prova) ou variável, impondo-se uma carga inicial que se dissipa ao longo do tempo. Sendo a condutividade hidráulica calculada com base na Lei de Darcy ajustada para as condições de contorno do ensaio.

Este tipo de ensaio é realizado principalmente em solo de baixa permeabilidade, ou em solos de difícil saturação, nos quais a saturação em permeâmetros de parede rígida levaria meses, ou ainda não seria possível.

### 3.2 – Ensaios de condutividade hidráulica em campo

Em campo foram realizados ensaios de condutividade hidráulica utilizando o permeâmetro de Guelph e ensaios de recuperação em poços de monitoramento.

Os ensaios de condutividade hidráulica com o permeâmetro de Guelph na zona não saturada foram executados de acordo com Elrick (1989). O cálculo da condutividade hidráulica foi realizado com as formulações de La Place e Elrick, ambas encontradas em Elrick (1989).

Estes ensaios foram realizados procurando atingir os quatro tipos de solo da área, entretanto, não foi possível a realização de ensaios no arenito. Nele o trado manual disponível não permitiu fazer a abertura do furo, necessário para o ensaio, devido a dureza e abrasão da rocha.

Foram selecionados cinco poços distribuídos ao longo da área de estudo (Figura 2) para realização dos ensaios de recuperação em poços de monitoramento (*Slug Test*). Selecionaram-se aqueles poços que continham mais informações do perfil geológico-geotécnico próximo à região do pré-filtro, para possibilitar associar o valor de K com o tipo de solo. A execução dos ensaios seguiu as recomendações de Butler (1998), sendo o cálculo da condutividade hidráulica dada pela formulação de Hvorslev (1951) modificada por Fetter (2001) e pela formulação de Bower-Rice (1976 *apud* Butler, 1998).

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os ensaios de caracterização geotécnica e de condutividade hidráulica, tanto os de laboratório como os de campo.

### 4.1 – Ensaios de caracterização geotécnica

A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização. Observa-se que os solos encontrados na área têm textura arenosa. A granulometria varia de areia siltosa a areia argilosa, enquanto a amostra coletada na região de solo aluvionar é uma areia limpa mal graduada.

Considerando a fração fina, os resultados mostram um maior grau de evolução para as amostras P3.3 e G9, as quais possuem fração fina pouco ativa e comportamento laterítico, o que indica que esses solos sofreram um processo de laterização mais intenso.

A amostra P3.2 mostrou-se menos alterada, com fração fina nociva e comportamento não laterítico. Isso já era esperado para um solo residual, ou seja, um solo pouco alterado com características próximas a rocha matriz, o arenito.

A amostra de arenito tem uma granulometria de areia argilosa e fração fina nociva com comportamento não laterítico. Esse fato também já era esperado, por se tratar de amostra de um local que ocorre um afloramento da rocha matriz, um material quase inalterado.

Com base nos resultados de caracterização, pode-se esperar, para a amostra P3.3, valores de condutividade hidráulica da ordem de  $10^{-5}$  a  $10^{-6}$  m/s, devido a sua granulometria ter predomínio de areia e sua fração fina ser pouco ativa, enquanto que para a amostra P3.2 espera-se

um valor de condutividade hidráulica menor, da ordem de  $10^{-6}$  a  $10^{-7}$  m/s, por esta possuir uma fração fina mais ativa e estrutura mais próxima da rocha matriz. Para amostra G9, areia média a fina limpa, com compacidade fofa durante inspeção tátil visual in situ, espera-se um valor de condutividade hidráulica da ordem de  $10^{-5}$  m/s.

A estimativa dos valores de K foi feita com base no que existe na literatura (Souza Pinto, 2008, Cedergreen, 1989 e Lambe e Withman, 1969) para vários tipos de solos.

Tabela 1 – Resultados dos Ensaios de Caracterização Geotécnica

Parâmetros	Amostras			
	P3.2	P3.3	P4	G9
Prof. (m)	4	2,5	0,5	0,5
Material (Gênese)	Residual de Arenito	Colúvio	Arenito	Alúvio
Granulometria Conjunta				
Areia (%)	63	73	80	92
Areia Média (%)	26	20	37	58
Areia Fina (%)	37	53	43	34
Silte (%)	30	7	11	4
Argila (%)	7	20	9	4
Finos (%)	37	27	20	8
Limites de Atterberg				
LL (%)	26,1	25,9	27,1	3,75
LP (%)	24,9	NP	16,4	NP
IP (%)	1,2	-	10,7	-
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,677	2,731	2,691	2,65
Classificação				
Classificação Unificada	Areia siltosa SM	Areia siltosa SM	Areia argilosa SC	Areia mal graduada SP
Adsorção de Azul de Metileno				
CTC (meq/100g)	14	3	8	0,59
Vb (g/100g)	4,4	0,9	2,5	0,2
Acb (g/100g)	63,1	4,5	27,6	4,7
S.E. (m <sup>2</sup> /g)	108	22,17	61,45	4,6
Classificação do Argilomineral <sup>1</sup>	Montm. Nociva	Ilita pouco Ativa	Montm. Nociva	Caulinita pouco Ativa
Comportamento Laterítico <sup>2</sup>	Não Laterítico	Laterítico	Não Laterítico	Laterítico

1. Classificação de Lautrin (1989 *apud* Pejon, 1992); 2. Classificação de Pejon (1992); Montm.- Montmorilonita; Prof.-Profundidade; LL- Limite de Liqueidez; LP- Limite de Plasticidade; IP- Índice de Plasticidade;  $\rho_s$ - Massa Específica dos Sólidos; CTC- Capacidade de Troca Catiônica; Vb- Massa de azul de metileno adsorvido em 100g de solo; Acb- Massa de azul de metileno adsorvido em 100g da fração fina do solo; SE- Superfície Específica.

Na amostra P4, arenito, a condutividade hidráulica deve estar mais intimamente ligada a sua estrutura que a sua granulometria, podendo apresentar condutividade hidráulica de materiais mais finos, assim, espera-se para esta amostra valores de condutividade hidráulica da ordem de  $10^{-7}$  a  $10^{-8}$  m/s.

4.2 – Ensaios de condutividade hidráulica

A Tabela 2 apresenta uma síntese de todos os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica realizados na área, os quais serão discutidos a seguir.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de condutividade hidráulica

Parâmetros	Tipo de Solo (Gênese)								
	Solo Coluvionar		Solo Aluvionar		Arenito		Residual de Arenito		
Ensaios de Laboratório em permeâmetro de parede rígida									
Amostra	P3.3		G9		P4		-		
Permeâmetro	de Aço		de PVC		de Aço		-		
Textura	Areia argilo-siltosa		Areia		Areia siltosa		-		
K <sub>20</sub> (m/s)	1,8x10 <sup>-6</sup>		2,0x10 <sup>-5</sup>		1,5x10 <sup>-8</sup>		-		
	2,2x10 <sup>-6</sup>		2,0x10 <sup>-5</sup>		3,8x10 <sup>-7</sup>		-		
K <sub>20</sub> médio (m/s)	3,8x10 <sup>-6</sup>		1,8x10 <sup>-5</sup>		-		-		
	2,6x10 <sup>-6</sup>		1,9x10 <sup>-5</sup>		2,0x10 <sup>-7</sup>		-		
Ensaios de laboratório em permeâmetros de parede flexível									
Amostra	-		-		P4		P3.2		
Corpo de Prova	-		-		CP2	CP4	CP5	CP2 CP3 CP4	
K <sub>20</sub> (m/s)	-		-		2,4x10 <sup>-8</sup>	1,5x10 <sup>-8</sup>	6,0x10 <sup>-8</sup>	9,7x10 <sup>-7</sup> 7,4x10 <sup>-7</sup> 1,9x10 <sup>-6</sup>	
K <sub>20</sub> médio (m/s)	-		-		3,3x10 <sup>-8</sup>		1,2x10 <sup>-7</sup>		
Ensaios de campo com o permeâmetro de Guelph									
Ponto	G4		G5	G8	G9	-		G1 G3	
Textura	Areia Siltosa		Areia Siltosa	Areia	Areia	-		Areia Silto-Argilosa Areia Silto-Argilosa	
K <sub>fs</sub> (m/s)	Laplace <sup>1</sup>		1,0x10 <sup>-5</sup>	1,6x10 <sup>-5</sup>	2,8x10 <sup>-4</sup>	2,8x10 <sup>-4</sup>	-		8,5x10 <sup>-7</sup> 3,1x10 <sup>-7</sup>
	Elrick <sup>1</sup>		4,1x10 <sup>-6</sup>	6,4x10 <sup>-6</sup>	1,1x10 <sup>-4</sup>	1,1x10 <sup>-4</sup>	-		3,4x10 <sup>-7</sup> 1,3x10 <sup>-7</sup>
K <sub>fs</sub> médio (m/s)	Elrick <sup>1</sup>		5,3x10 <sup>-6</sup>	1,1x10 <sup>-4</sup>		-		2,4x10 <sup>-7</sup>	
Ensaios de recuperação em poços de monitoramento									
Poço	-		PP-5B		-		PP-04	PP-11 PP-12 PP-13	
K <sub>r20</sub> (m/s)	Hvorslev <sup>2</sup>		-		8,5x10 <sup>-7</sup>	-		4,4x10 <sup>-7</sup> 4,4x10 <sup>-7</sup> 4,5x10 <sup>-7</sup> 4,6x10 <sup>-6</sup>	
	Bower-Rice <sup>3</sup>		-		7,2x10 <sup>-7</sup>	-		3,0x10 <sup>-7</sup> 3,0x10 <sup>-7</sup> 2,8x10 <sup>-7</sup> 3,1x10 <sup>-6</sup>	
K <sub>r20</sub> médio (m/s)	-		7,9x10 <sup>-7</sup>		-		3,7x10 <sup>-7</sup> 3,7x10 <sup>-7</sup> 3,7x10 <sup>-7</sup> 3,9x10 <sup>-6</sup>		

1 - Equações de Laplace e Elrick para o cálculo de K<sub>fs</sub>, ambas encontradas em Elrick(1989); 2 - Formulação de Hvorslev (1951 adaptado por FETTER, 2001) para o cálculo de K<sub>r20</sub>; 3 - Formulação de Bower-Rice (1976) para o cálculo de K<sub>r20</sub>; K<sub>20</sub> - Condutividade Hidráulica na direção vertical corrigida para 20°C; K<sub>fs</sub> - Condutividade Hidráulica de Campo Saturado; K<sub>r20</sub> - Condutividade Hidráulica na direção radial horizontal corrigida para 20°C.

4.2.1 – Ensaios em laboratório

Inicialmente foram realizados os ensaios em permeâmetros de parede rígida. Nesta primeira campanha de ensaios não houve a saturação satisfatória dos corpos de prova de solo residual e de arenito quando se utilizou os permeâmetros de aço com vedação de bentonita.

Os ensaios foram iniciados simultaneamente em três corpos de prova de solo residual. Após dois meses de percolação com um gradiente hidráulico igual a 10, que foi elevado para 25 em duas semanas adicionais, não houve a saturação dos corpos de prova. Após a retirada dos corpos de prova dos permeâmetros constatou-se que não havia nenhum indício de entupimento ou mau funcionamento e

as extremidades dos corpos de prova estavam molhadas e seu interior praticamente seco.

Seis corpos de prova da amostra de arenito foram ensaiados, realizando-se três ensaios simultâneos por vez. Na primeira réplica, após quatro semanas de percolação com aplicação de gradiente hidráulico de 10, apenas dois corpos de prova atingiram a saturação. Na segunda réplica após dois meses de percolação com gradiente 10 e um mês adicional com gradiente 25 não houve a saturação dos corpos de prova. Novamente durante as desmontagens não foram encontrados indícios de entupimento ou mau funcionamento.

A dificuldade de saturação desses tipos de solo provavelmente deve-se a sua estrutura que de algum modo impede a saída do ar de seus interstícios gerando bolhas oclusas durante a percolação que não permitem o fluxo de

água e a saturação do corpo de prova. Neste sentido buscou-se utilizar o processo de saturação por contra pressão para o solo residual e para o arenito empregando-se o permeâmetro de parede flexível.

Para os demais solos ensaiados com o permeâmetro de parede rígida a saturação foi facilmente atingida aplicando-se gradiente hidráulico igual a 5.

Nos ensaios com o permeâmetro de parede flexível foi necessária a adoção de vários incrementos de pressão confinante e contrapressão sucessivos chegando-se a valores de pressão acima de 900 KPa. Apesar da elevada pressão, pode-se considerar que não houve consolidação dos corpos de prova, uma vez que a tensão efetiva foi sempre mantida em torno de 20 KPa. Deste modo, os corpos de prova não sofreram variações de volume significativas durante o processo de saturação.

A Figura 6 e a Figura 7 apresentam os gráficos do processo de saturação dos corpos de prova. Nestes gráficos pode-se observar como este processo ocorre, nota-se que há um incremento de contrapressão em resposta ( $\Delta u_r$ ) ao incremento de pressão confinante imposto ( $\Delta \sigma$ ) e posteriormente é imposto um incremento de contrapressão ( $\Delta u_i$ ) até os incrementos interno e externo de pressão ao corpo de prova se igualarem. Com a sucessão dos incrementos de pressão as respostas da contrapressão em relação à imposição dos incrementos de pressão confinante aumentam a cada sucessão até ser praticamente igual ao incremento de pressão confinante ( $B \geq 0,95$ ), quando ocorre a saturação do corpo de prova.

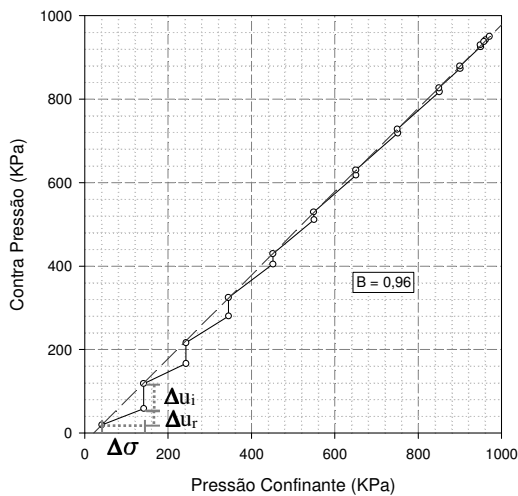


Figura 6 – Processo de saturação por contra pressão do corpo de prova CP2 de Arenito

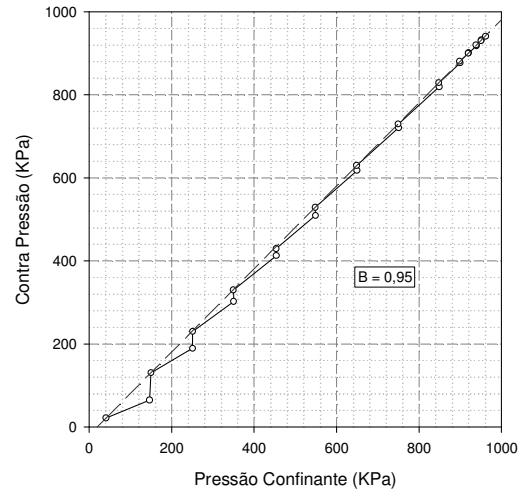


Figura 7 – Processo de saturação por contra pressão do corpo de prova CP2 de Solo Residual de Arenito.

Os valores médios de  $K_{20}$  determinados em permeâmetros de parede rígida foram  $2,6 \times 10^{-6}$  e  $1,9 \times 10^{-6}$  m/s, respectivamente, para o solo coluvionar e aluvionar.

Para o arenito determinaram-se valores de condutividade hidráulica distintos, de uma ordem de grandeza ( $1,5 \times 10^{-8}$  e  $3,8 \times 10^{-7}$  m/s), para os dois corpos de prova onde a saturação foi satisfatória. Deste modo, não se pode assumir um valor médio a partir desses dois valores.

Nos ensaios com o permeâmetro de parede flexível foram determinados os valores médios de  $K_{20}$  de  $3,3 \times 10^{-8}$  m/s e de  $1,2 \times 10^{-7}$  m/s para o solo residual de arenito e para o arenito, respectivamente.

A Figura 8 e a Figura 9 mostram os gráficos das diversas medidas de  $K_{20}$  realizadas ao longo do tempo de percolação, respectivamente, para os corpos de prova de arenito e solo residual de arenito no permeâmetro de parede flexível. Nestes gráficos tem-se plotados os valores médios de  $K_{20}$  para cada solo. A variação das medidas deve-se ao ruído no sinal do medidor de variação de volume (transdutor de pressão diferencial – Figura 5) utilizado para a medida instantânea da variação do volume. Durante a condução dos ensaios, melhorias no aterramento deste sensor possibilitou uma redução do ruído e uma maior estabilidade nas leituras.

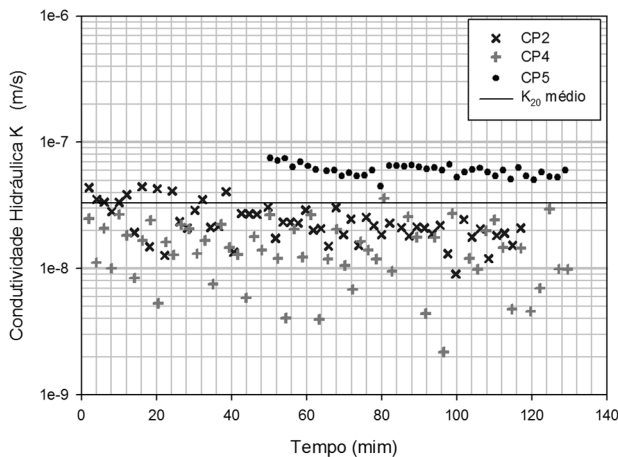


Figura 8 – Variação de K ao longo do tempo de percolação para três corpos de prova de arenito

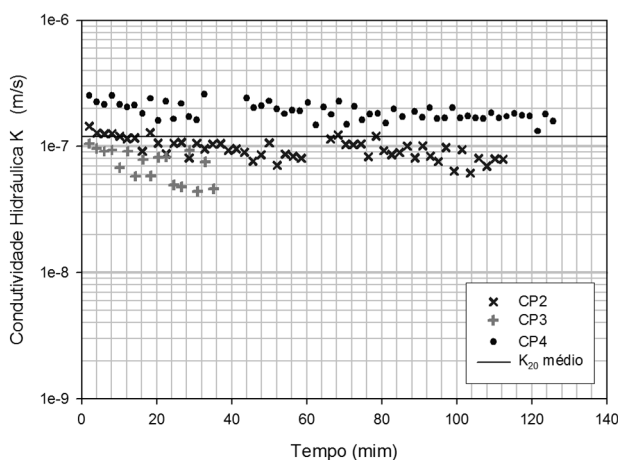


Figura 9 – Variação de K ao longo do tempo de percolação para três corpos de prova de solo residual de arenito

#### 4.2.2 – Ensaio de Campo

Os valores de K determinados em campo com o permeâmetro de Guelph foram, de um modo geral, uma ordem de grandeza maior que os encontrados em laboratório para o solo aluvionar.

Basicamente, para os ensaios com o permeâmetro de Guelph, os resultados mais representativos são aqueles determinados com o método de Elrick (1989). Pode-se considerar que os valores encontrados com o uso da equação de Laplace são referências de valores máximos de condutividade hidráulica para os solos ensaiados, pois esta equação considera nula a influência da capilaridade no solo não saturado, ou seja, considera como granulares (areias e granulometrias maiores) puros os solos ensaiados.

Os ensaios de recuperação nos poços de monitoramento atingiram o solo residual e aluvionar, conforme pôde ser observado na interpretação dos perfis desses poços, uma vez que o pré-filtro submerso ao nível d'água encontrava-se instalado nessa região.

Constatou-se que os resultados obtidos também não apresentaram variação significativa com a alteração do método de cálculo. O poço PP-13 apresentou valores de condutividade hidráulica de  $4,6 \times 10^{-6}$  e  $3,1 \times 10^{-6}$  m/s, praticamente uma ordem de grandeza maior que os demais

poços instalados em solo residual. Isso provavelmente se deve ao fato do material que ocorre no entorno do pré-filtro deste poço apresentar um menor grau de consolidação que os demais.

O poço PP-5B, instalado em solo aluvionar, mostrou valores de K iguais a  $8,5 \times 10^{-7}$  e  $7,2 \times 10^{-7}$  m/s, menores que aqueles determinados em laboratório e com o permeâmetro Guelph. A razão disso é que o subsolo nessa região apresenta camadas de areia com presença de lentes de argila entre as profundidades de 6,00 a 9,50 m. O ensaio de recuperação em poço é representativo de toda uma região, nesse caso de 7,57 a 24,80 m de profundidade, enquanto os ensaios de laboratório e com o permeâmetro Guelph foram realizados numa camada superficial de areia limpa, em uma profundidade média de 0,5 m.

Com base nos resultados dos ensaios realizados nos poços de monitoramento pode-se afirmar que o valor médio de K é igual a  $7,9 \times 10^{-7}$  m/s para a camada de solo aluvionar mais profunda. Já, para o solo residual, pode-se afirmar que o valor médio de K é igual a  $3,7 \times 10^{-7}$  m/s. A única particularidade foi para o poço PP-13, onde a região atingida apresentou valor médio de K de  $3,9 \times 10^{-6}$  m/s.

## 5 – CONCLUSÕES

As diferentes técnicas empregadas em campo e em laboratório possibilitaram a determinação de valores representativos de condutividade hidráulica para os quatro tipos de solo que ocorrem na área de estudo.

Para o solo coluvionar, têm-se os valores de condutividade hidráulica médios de  $2,6 \times 10^{-6}$  m/s em laboratório e de  $5,3 \times 10^{-6}$  m/s em campo, utilizando o permeâmetro de Guelph. Este último pode ser considerado mais representativo, pois sofre influência dos caminhos preferenciais naturais do solo, o que não ocorre no laboratório, devido ao fluxo unidimensional e ao tamanho reduzido do corpo de prova quando comparado ao maciço.

No solo aluvionar foram determinados valores médios de K tanto em campo ( $1,1 \times 10^{-4}$  m/s com o permeâmetro Guelph) como em laboratório ( $1,9 \times 10^{-5}$  m/s). No poço PP-5B o valor de K de campo foi de  $7,9 \times 10^{-7}$  m/s. Como os resultados de campo podem ser considerados mais representativos assumiu-se para camada superficial do aluvião o valor de  $1,1 \times 10^{-4}$  m/s e para a porção mais profunda o valor de  $7,9 \times 10^{-7}$  m/s.

O solo residual de arenito apresentou valores médios de condutividade hidráulica iguais a  $1,2 \times 10^{-7}$  m/s em laboratório e de  $2,4 \times 10^{-7}$  m/s com o permeâmetro de Guelph. Devido ao elevado tempo de ensaio no campo (6 horas), com grande variação de temperatura ambiente e insolação, considerou-se o valor encontrado em laboratório mais representativo de K, uma vez que lá as condições de ensaio foram mais controladas. Na zona saturada recomenda-se adotar como representativo o valor de K igual a  $3,7 \times 10^{-7}$  m/s, lembrando que foi determinado um valor diferente deste no entorno do poço PP-13 (igual a  $3,9 \times 10^{-6}$  m/s).

Para o arenito pode ser adotado como valor médio representativo da condutividade hidráulica aquele determinado em laboratório, igual a  $3,3 \times 10^{-8}$  m/s.

## AGRADECIMENTOS

À FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo pela bolsa de mestrado concedida (Processo Nº 2009/12764-0). À EMDURB – Empresa Municipal de Desenvolvimento Urbano de Bauru, pelo total apoio as pesquisas já realizadas no Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos de Bauru.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459**: solo – determinação do limite de liquidez, CB-02, Rio de Janeiro, 1984, 6 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**: solo – determinação do limite de plasticidade, CB-02, Rio de Janeiro, 1984, 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: solo – análise granulométrica, CB-02, Rio de Janeiro, 1988, 13 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13292**: solo – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante, CB-02, Rio de Janeiro, 1995, 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 14545**: solo – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável, CB-02, Rio de Janeiro, 2000, 12 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 5084**: Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. ASTM International, West Conshohocken, USA, 2001, 23 p.

BUTLER, J. J. **The design, performance and analysis of slug tests**. Boca Raton : Lewis, c1998, 252 p.

CEDERGREN, H. R. (1989). **Seepage, drainage, and flow nets**. New York: John Wiley & Sons, 1989 465 p., il.

ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D.; TAN, K. A. **Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. Ground Water Monitoring and Remediation**, Summer 1989. National Ground Water Association, USA, 1989.

EMDURB, Histórico do aterro. **Empresa de Desenvolvimento Urbano e Rural de Bauru**, 2012, Disponível em: <[http://www.emdurb.com.br/site2010/ambiental/index\\_ambiental.php](http://www.emdurb.com.br/site2010/ambiental/index_ambiental.php)>. Acesso em: 05 mar. 2012.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. 4<sup>th</sup> ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. c2001.

**GOOGLE EARTH**. Vista da área do aterro de resíduos sólidos de Bauru. Disponível em: <[Google.com/earth](http://Google.com/earth)>. Acesso em: 05 mar. 2012.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics**. New York: J. Wiley. Ix, 1969, 553 p.

MONDELLI, G. **Integração de diferentes técnicas de investigação para avaliação da poluição e contaminação de uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos**.

Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, SP, 2008.

PEJON, O. J. **Mapeamento Geotécnico da Folha de Piracicaba – SP (Escala: 1:100.000): Estudos de Aspectos Metodológicos de Caracterização e de Apresentação dos Atributos**, 1992, v. 1, p. 1-224. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1992.

SOUZA PINTO, C. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3ª Ed. São Paulo: Oficina de Textos. 2006.