



DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE UMA ÁREA CONTAMINADA NO MUNICÍPIO DE SANTO ANDRÉ UTILIZANDO-SE MÉTODO SLUG TEST

DETERMINING THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF A CONTAMINATED AREA IN SAO PAULO USING SLUG TEST METHOD

Ana Maciel de Carvalho¹, Leandro Gomes de Freitas², Alexandre Muselli Barbosa³, José Luiz Albuquerque Filho⁴, Giulliana Mondelli⁵

Artigo recebido em: 25/07/2013 e aceito para publicação em: 27/11/2013.

Abstract: The Metropolitan Region of São Paulo presents several environmental liabilities, which could to compromise groundwater quality. This scenario demands research and remediation studies, as well as controls on land and groundwater use. One of the most important hydrodynamic parameters used to characterize aquifers is the hydraulic conductivity. This parameter can be obtained by permeability tests like Slug Test, one of the most common methods currently used in contaminated sites investigation, mainly in locations that are characterized with low capacity to groundwater circulation. This paper describes the application of this method, comparing those proposed by Hvorslev (1951) and Bouwer & Rice (1976) and using the software Aquifer Test Pro (version 2010.1) to interpretation of data from different hydrogeological layers of the contaminated site in Santo André-SP. Therefore, were selected 8 shallow wells (up to 7 m deep); and 11 deeper wells (up to 25.8 m deep). Among the 19 wells tested, Slug Test repetition was realized in 8 wells in order to obtain more representative results. The results were similar for both methods and was demonstrated that the soil characterized by landfill had the highest hydraulic conductivity, which average is 4.76 E-06 m.s-1, and the residual soil presented the lower hydraulic conductivity, averaging 9.03 E-07 m.s-1.

Keywords: Slug Test. Hydraulic conductivity. Contaminated sites.

Resumo: A Região Metropolitana de São Paulo possui inúmeros passivos ambientais que podem vir a comprometer a qualidade das águas subterrâneas. Essa situação demanda estudos de investigação, remediação e controle do uso do solo e da água subterrânea. Um dos parâmetros hidrodinâmicos mais importantes para a caracterização dos aquíferos é a condutividade hidráulica, podendo ser obtida por ensaios de permeabilidade do tipo Slug Test, um dos métodos mais utilizados atualmente na investigação de áreas contaminadas, notadamente naqueles locais caracterizados por baixa capacidade de circulação da água subterrânea. O presente artigo descreve a aplicação desse método, comparando-se aqueles propostos por Hvorslev (1951) e Bouwer & Rice (1976) e utilizando-se o software Aquifer Test Pro (versão 2010.1) para interpretação dos dados obtidos em ensaios de campo, nas diferentes camadas hidrogeológicas em uma área contaminada no município de Santo André-SP. Para isso, foram selecionados 8 poços rasos, de até 7 m de profundidade; e 11 poços mais profundos, de até 25,8 m de profundidade. Dentre os 19 poços ensaiados, realizou-se a repetição em 8 visando obter dados mais representativos. Os resultados foram semelhantes para ambos os métodos e demonstraram que o solo caracterizado por aterro apresentou maior condutividade hidráulica, com média de 4,76E-06 m.s-1, e o solo residual com a menor condutividade hidráulica, apresentou valor médio de 9,03E-07 m.s-1.

Palavras-chave: Slug Test. Condutividade hidráulica. Área contaminada.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas os estudos de investigação de áreas contaminadas têm se tornado

uma atividade frequente para a resolução de problemas de passivos ambientais, principalmente

¹ Geóloga do Laboratório de Recursos Hídricos e Avaliação Geoambiental, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (anamaci01@yahoo.com.br).

² Engenheiro Ambiental do Laboratório de Resíduos e Áreas Contaminadas, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (lfreitas@ipt.br).

³ Laboratório de Resíduos e Áreas Contaminadas, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (muselli@ipt.br).

⁴ Geólogo, Dr. no Laboratório de Recursos Hídricos e Avaliação Geoambiental, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (albuzelu@ipt.br).

⁵ Laboratório de Resíduos e Áreas Contaminadas, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (giullia@ipt.br).

nos grandes centros urbanos como a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), sudeste do Brasil. Em grande parte das áreas contaminadas, a infiltração de contaminantes em aquíferos pode resultar em grave alteração da qualidade da água subterrânea, demandando medidas de caracterização, remediação e controle de uso.

Em estudos hidrogeológicos com o objetivo de se caracterizar essas áreas, um dos parâmetros hidráulicos mais importantes a serem obtidos é a condutividade hidráulica (K), pois a mesma reflete a capacidade da água circular através de um meio. Segundo Freeze & Cherry (1979), esse parâmetro pode variar até treze ordens de grandeza na natureza. Dessa forma, é fundamental a sua correta obtenção, para a estimativa das velocidades dos fluxos subterrâneos que são diferentes para cada meio litológico e, conseqüentemente, para a posterior avaliação do comportamento das plumas de contaminação.

Um dos métodos mais utilizados atualmente, para a obtenção da condutividade hidráulica em poços de monitoramento, são os ensaios de permeabilidade do tipo *Slug Test*. Esses ensaios se caracterizam pela adequabilidade ao contexto das áreas contaminadas, devido à sua facilidade de execução, baixo custo e por se evitar a inserção de líquidos, o que poderia modificar as características locais de qualidade e quantidade, além do fluxo, e/ou a retirada de água contaminada do aquífero, que necessitaria de destinação adequada (PEDE, 2004). Além disso, são indicados para ensaiar materiais que tendem a apresentar baixa capacidade de circulação da água subterrânea.

Para a análise dos dados do *Slug Test* alguns modelos matemáticos foram desenvolvidos considerando-se diferentes tipos de aquífero, profundidade dos trechos ensaiados de poços de monitoramento, conforme localização de filtros, dentre outras características.

O método de Cooper et al. (1967) foi desenvolvido para fluxos bidimensionais e aquíferos confinados e permite estimar a condutividade hidráulica e o coeficiente de armazenamento. Por sua vez, os métodos como de Hvorslev (1951) e Bouwer & Rice (1976) são aplicados para fluxos tridimensionais e permitem calcular a condutividade hidráulica, sendo que esses últimos autores propõem método voltado especificamente para aquíferos livres.

Bouwer (1989) aplicou e validou o uso do método Bouwer & Rice (1976) em aquíferos confinados, consideradas as seguintes condições: i) topo do filtro se situar a uma distância razoável do fundo do aquífero inferior; e ii) em poços de qualquer diâmetro e profundidade, desde que conhecidas as dimensões.

Independentemente do método a ser utilizado na interpretação dos ensaios, Butler et al. (1993) estudaram a aplicação de *Slug Test* em um conjunto de camadas hidrogeológicas diferentes, comprovando a implicação de erros em valores de condutividade hidráulica, ensaiando-se essas porções conjuntamente. Sendo assim, os autores recomendam analisar uma camada hidrogeológica por vez. Butler et al. (1993) e Zlotnik & McGuire (1998) sugerem e descrevem uma maneira simples de ensaiar num mesmo poço diversas camadas separadamente, por meio de *Slug Test* em poços multiníveis, com o uso de um sistema de duplo *packers* e compressor pneumático.

Nesse contexto, é importante definir um modelo conceitual detalhado do meio hidrogeológico a ser estudado, de modo a se obter subsídios para a instalação e seleção de poços com seções filtrantes representativas de cada camada a ser ensaiada, além de se conhecer as características hidrogeológicas e de poços para selecionar o melhor método para interpretação dos resultados.

O presente artigo descreve a aplicação dos ensaios de *Slug Test* na caracterização da condutividade hidráulica de uma área contaminada localizada no município de Santo André, com posterior interpretação dos ensaios utilizando-se o software *Aquifer Test Pro* (versão 2010.1), e comparação dos resultados obtidos pela aplicação dos métodos de Hvorslev (1951) e Bouwer & Rice (1976). O trabalho apresenta, também, os critérios de seleção de poços de monitoramento representativos para a caracterização do fluxo das águas subterrâneas nas diferentes camadas hidrogeológicas em uma área contaminada na RMSP.

ÁREA DE ESTUDO

O local selecionado para o presente estudo é uma área de cerca de 300.000 m², situada ao norte do município de Santo André - SP, pertencente à Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) (Figura 1).

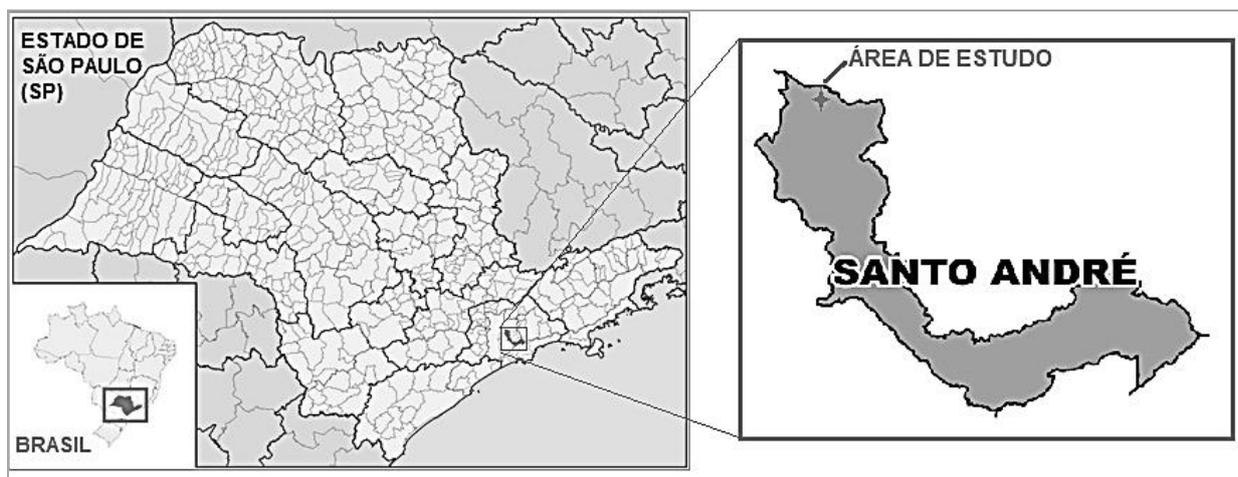


Figura 1 – Figura esquemática da localização da área de estudo no município de Santo André - SP, Brasil
Figure 1 – Schematic picture from the area localization in Santo André-SP city

A região se caracteriza geologicamente por uma transição sedimentar das formações São Paulo e Resende, depositados na Bacia de São Paulo, que se sobrepõem ao embasamento cristalino caracterizado por rochas de metamorfismo de baixo grau, tais como micaxistos, de idade proterozóica, os quais foram posteriormente intrudidos por rochas de composição máfica/diabásio. Assentados nesses micaxistos observam-se sedimentos intercalados constituídos de areias, argilas e os demais materiais inconsolidados, todos de idade quaternária (CPRM, 1999).

A área de estudo foi utilizada, entre 1912 e 1982, como bota-fora de solo contaminado (resíduo) proveniente de indústrias petroquímica,

ENSAIOS DO TIPO *SLUG TEST*

O ensaio *Slug Test* consiste em uma técnica de campo para a determinação da condutividade hidráulica (K) horizontal do aquífero em poços de monitoramento (geralmente de pequeno diâmetro). Esse ensaio é realizado com a introdução ou a retirada de um cilindro sólido de volume conhecido (*slug* ou cilindro de inserção) no interior do poço de monitoramento, provocando a variação instantânea de nível d'água. Esse volume deslocado equivale à adição ou à retirada de água do poço e é proporcional ao volume do cilindro.

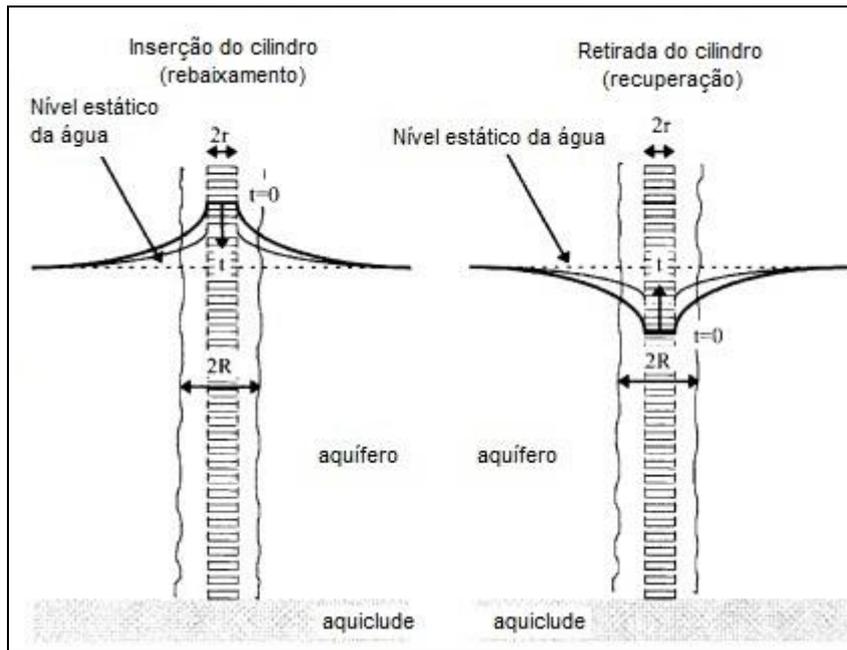
Durante o ensaio, quando o cilindro é inserido, ocorre uma elevação instantânea do nível de água e avalia-se o tempo de rebaixamento desse nível e, quando o cilindro é retirado, ocorre uma queda instantânea do nível de água e avalia-se o tempo de recuperação do nível d'água (Figura 2).

como refinaria de petróleo, fábricas de Hexacloretohexano (HCH), de soda cáustica, de sulfato de alumínio, de Rayon (Viscose), de papelão, e, também, atividades relacionadas à lavagem de caulim.

Em 1987, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) realizou amostragens do solo contaminado e constatou uma concentração de HCH de 435 mg/kg. Mais recentemente, o valor de intervenção residencial desse composto estabelecido pela legislação (CETESB, 2005) é de 0,1mg/kg. Por esses motivos, essa área foi declarada contaminada, exigindo estudos hidrogeológicos detalhados para subsidiar a proposição de medidas adequadas de intervenção.

O uso de *Slug Test* apresenta algumas vantagens, por ser simples, rápido e de baixo custo; apresentar resultados compatíveis com outros métodos; ser o mais usado para a determinação da condutividade hidráulica no mundo; ser apropriado para uma ampla gama de poços (de pequeno diâmetro); gerar quantidade reduzida de efluentes; não ser necessário inserir ou extrair água; não necessitar de equipamentos de bombeamento; poder ser realizado por apenas uma pessoa quando se utiliza o transdutor de pressão; possibilitar em um mesmo poço a execução de dois ensaios, de rebaixamento e recuperação, na sequência.

Por outro lado, o método apresenta desvantagem por avaliar somente um raio de 1 m ao redor do poço; para aquíferos muito permeáveis é necessário o uso de transdutores de pressão na medição dos níveis; não determina o grau de armazenamento do aquífero; e ainda necessita que o poço seja muito bem desenvolvido previamente.



Fonte: Adaptado de Thomas Rohrich & Waterloo Hydrogeologic Inc. (2002).

Figura 2 – Métodos de rebaixamento e recuperação durante a realização do Slug Test
Figure 2 – Drawdown and recovery methods during the realization of Slug Test

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo de uma área para a caracterização da condutividade hidráulica por meio de ensaios do tipo *Slug Test* exige uma avaliação geoambiental prévia, em termos de geologia, hidrografia, geomorfologia e hidrogeologia; um estabelecimento de critério de seleção de poços a serem amostrados; e definição do método de execução e interpretação dos ensaios realizados.

Caracterização da área

Para caracterização detalhada da área foram realizados: o levantamento topográfico; estudos geofísicos utilizando os métodos de eletrorresistividade e sísmica de superfície; e elaboração do mapa de uso e ocupação do solo.

Ao todo, foram construídos 40 poços de monitoramento. Antes da construção de cada poço de monitoramento, foi realizada a sondagem do terreno por meio de *liners*, determinando assim o nível d'água subterrânea no local, utilizado para a orientação da profundidade de instalação do poço de monitoramento, e a coleta de material para a

classificação táctil-visual do solo. Os resultados da classificação foram utilizados para a construção dos perfis estratigráficos e posterior elaboração da seção geotécnico-geológica da área estudada.

Seleção dos poços

A seleção dos poços foi realizada buscando-se identificar, principalmente, os que apresentavam a seção filtrante em uma camada litológica mais homogênea, com características semelhantes, como solo residual, aluvião, solo de alteração e aterro. Com isso, foi possível obter dados de diferentes porções litológicas para auxiliar na investigação geoambiental da área de estudo.

Além disso, foi observada a espacialização dos poços visando cobrir toda a área e, também, as profundidades, selecionando 8 poços rasos, de até 7 m; e 11 poços mais profundos, de 7m até 25,8 m (Tabela 1). Todos eles possuem filtros totalmente submersos.

Tabela 1 – Características dos poços de monitoramento selecionados para os ensaios de Slug Test
Table 1 – Characteristics from monitoring wells selected for Slug Test

Poço	Prof. filtro (m)	Litologia no Filtro	Caracterização geológica no Filtro	NA - (m) (abril/2012)
PM-5	0,80-2,80	Argila arenosa variegada com entulho e pedregulhos	Aterro / Aluvião	0,54
PM-10	5,00-6,00	Argila siltosa vermelha variegada cinza compacta	Aluvião	4,94
PM-14A	4,00-5,00	Areia média a grossa argilosa com pedregulhos finos a médios	Aluvião	0,96
PM-14B	11,30-12,30	Argila siltosa variegada cinza marrom amarelada com nódulos argilosos compacta	Solo de Alteração de Rocha (SAR)	1,49
PM-15A	4,85-5,85	Argila pouco arenosa	Aluvião	2,17
PM-16	7,50-8,50	Argila arenosa marrom escura, com pedregulhos (britas de gnaiss)	Aluvião	4,79
PM-17	4,10-5,10	Argila cinza (orgânica)	Aluvião	2,31
PM-18A	6,00-7,00	Transição entre argila e areia cinza com seixos pequenos	Aluvião	5,25
PM-19B	14,40-15,40	Argila arenosa, variegada cinza marrom amarelada, muito compacta com pedr.	Residual	2,68
PM-20A	4,50-5,50	Argila arenosa a areia siltosa cinza variegada	Aluvião	2,93
PM-20B	10,10-11,10	Argila cinza variegada marrom compacta	Residual	2,819
PM-21A	3,25-4,25	Argila silto-arenosa, cinza escura, com pedregulhos e fragmentos de entulho	Aterro	1,6
PM-21B	10,70-11,70	Areia argilosa variegada cinza e vermelha pegajosa, compacta, com pedregulhos	Seixos	3,66
PM-23A	6,50-7,50	Areia média a grossa marrom micácea saturada com pedregulhos	Aluvião	4,15
PM-23B	17,10-18,10	Argila silto-arenosa cinza clara variegada marrom amar., com grânulos, compacta	Residual	4,06
PM-25B	11,05-12,05	Argila arenosa cinza variegada compacta	Residual	1,17
PM-26	11,00-12,50	Areia grossa a média siltosa marrom clara avermelhada com pedr. e mica	Residual	5,84
PM-28B	11,30-12,30	Argila arenosa marrom escura acimentada com grânulos	Residual	3,12
PM-29	22,80-25,80	Argila arenosa marrom	Solo de Alteração de Rocha (SAR)	15,71

Assim sendo, foram selecionados 19 poços (PM-05, PM-10, PM-14A, PM-14B, PM-15A, PM-16, PM-17, PM-18A, PM-19B, PM-20A,

PM-20B, PM-21A, PM-21B, PM-23A, PM-23B, PM-25B, PM-26, PM-28B, PM-29) (Figura 3).

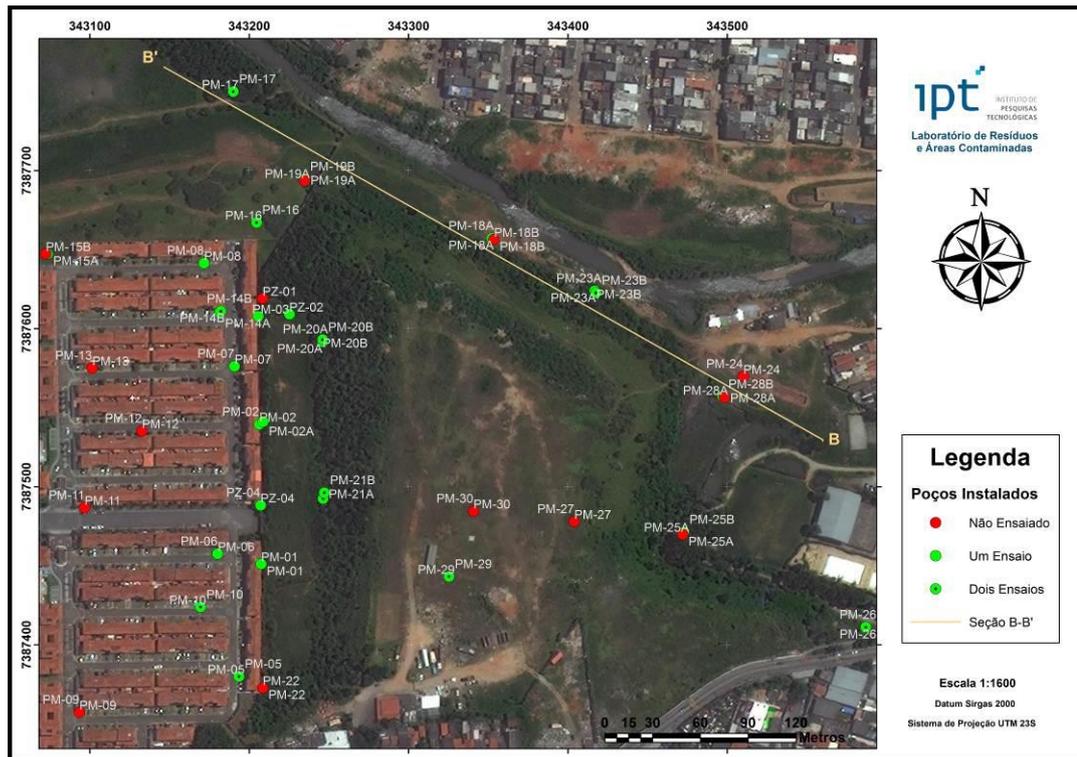


Figura 3 – Localização dos poços de monitoramento existentes na área de estudo, englobando aqueles selecionados para os ensaios *in situ* e também a indicação da seção geológico-geotécnica B-B´

Figure 3 – Localization of monitoring wells in study área, including that selected for test and also indication of the geological and geotechnical cross-section B-B´

Além disso, dentre os 19 poços ensaiados foram selecionados 8 (PM-05, PM-17, PM-19B, PM-21A, PM-22, PM-23A, PM23B, PM-26) para avaliar a repetibilidade do ensaio. Esses poços foram priorizados em relação aos outros por conta de imprevistos em campo ou mesmo por estarem localizados em locais mais estratégicos.

Em cada local selecionado para ensaio, foi efetuada verificação acerca de eventual existência de possíveis elementos que poderiam ocasionar variações do nível d'água, como poços no entorno e em regime de bombeamento, redes de água, esgoto, etc. Ao redor da área de estudos foram mapeadas 4 (quatro) nascentes e um poço cacimba que, dadas as distâncias significativas em rela-

ção aos pontos de interesse, avaliou-se que não interfeririam nos ensaios.

Execução do *Slug Test*

Para a execução dos ensaios *Slug Test* foi necessário utilizar alguns equipamentos, tais como: um cilindro de PVC rígido com dimensões conhecidas (volume de 1,14 L, 1 m de comprimento e diâmetro de 0,038 m) (Figura 4); cabo para fixar em uma das extremidades o cilindro; kit de ferramentas básicas para eventuais necessidades; materiais para desinfecção dos cilindros entre um e outro ensaio; calculadora simples; cronômetro; prancheta; ficha de campo; e um medidor de nível d'água com graduação.



Figura 4 – Cilindro em PVC utilizado na realização dos ensaios *Slug Test*
Figure 4 – PVC cylinder used in *Slug Test*

Os ensaios foram realizados no período 5 a 20 de abril de 2012, respeitando-se as 8 etapas seguintes:

1 - Medição do nível d'água estático no poço de monitoramento e registro em ficha de campo. Após 10 minutos, foi repetido o processo;

2 - Introdução do cilindro instantaneamente no poço. O nível d'água ascendeu acima do nível d'água estático;

3 - Posicionamento do sensor de medição do nível da água no interior do poço, juntamente com a introdução do cilindro. O sensor deve ser mantido acima da posição prevista para a profundidade do nível d'água, calculada previamente com a avaliação do volume do cilindro e da seção do poço;

4 - Medição do nível d'água no instante de equilíbrio, adotando-se esses valores como o tempo inicial (tempo zero) e nível d'água inicial (altura zero);

5 - Medição do nível d'água em intervalos curtos no início e mais longos em seguida;

6 - Acompanhamento do rebaixamento do nível d'água até recuperação do valor em pelo menos 90% em relação à variação da carga hidráulica inicial (altura da água inicial em relação ao datum);

7 - Retirada do cilindro sólido introduzido no poço, quando o nível d'água retornar ao seu nível estático inicial, respeitando no mínimo 30 minutos de ensaio, ou pelo menos recuperação de 90% em relação à variação da carga hidráulica inicial, ou no máximo 60 minutos de ensaio quando não atingir esse valor; e

8 - Medição da ascensão do nível d'água, após a retirada do cilindro, cuja altura irá rebaixar e imediatamente iniciará ascensão. Efetuar a medição do nível d'água em intervalos regulares de tempo até o do nível d'água retornar a sua posição original (nível estático inicial) ou pelo menos

estar recuperado 90% em relação à variação da carga hidráulica inicial (altura inicial em relação ao datum).

O procedimento acima é recomendável para aquíferos de baixa permeabilidade, sendo a forma mais precisa e simples de medição do nível d'água, principalmente para aquíferos com valores de condutividade hidráulica mais elevada, porém mais custosa para realização do ensaio, é com a utilização de transdutores de pressão. Esse sensor permite medir e armazenar eletronicamente as medidas da variação do nível d'água no intervalo desejado, dispensando o uso manual de medidores de nível d'água.

Butler (1997) recomenda realizar três ensaios por poço para obter um valor mais representativo. No entanto, devido às diversas dificuldades de campo e tempo disponível, foi possível realizar tais repetições em apenas oito poços. Portanto, para cada poço foi realizado ao menos um ensaio de rebaixamento e um de recuperação de nível d'água e interpretado por mais de um método.

Interpretação de dados

Para interpretação do ensaio *Slug Test* e cálculo da condutividade hidráulica por meio do procedimento de introdução e retirada do cilindro no interior do poço, podem ser aplicados os métodos teóricos desenvolvidos por Hvorslev (1951), Bower & Rice (1976), Cooper et al. (1967), dentre outros.

Para o presente trabalho, foram utilizados os métodos de Hvorslev (1951) e Bower & Rice (1976).

O método de Hvorslev pode ser aplicado para, aquíferos livre e confinado, de extensão praticamente infinita, homogêneo, isotrópico, de espessura uniforme, baixo gradiente hidráulico. O poço de monitoramento pode ser total ou parcialmente penetrante no aquífero, com fluxo radial

horizontal e água acima do limite superior da seção filtrante.

As medições de rebaixamento/recuperação devem ser feitas em intervalos de tempo pré-determinados. Na Figura 5 é apresentada a geometria para sua execução e a correspondente formulação para cálculo de condutividade hidráulica (Equação 1).

$$K = \frac{r^2 \ln\left(\frac{L}{R}\right)}{2LT_o} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

K = condutividade hidráulica [L/T]

R = raio da perfuração [L]

r = raio do revestimento [L]

Ho = altura do nível d'água no instante inicial do ensaio (t=0) [L]

H1, h2 = altura do nível d'água nos instantes t1, t2 [L]

H = altura do nível d'água do instante t [L]

To = tempo onde H/Ho = 0,37 (37% do rebaixamento/recuperação) [T]

L = comprimento da seção filtrante [L]

Para interpretação, as variações do nível da água com o tempo em relação ao nível da água no tempo zero são avaliadas por meio do cálculo de Ht (razão de rebaixamento), em que Ht = H/Ho (onde H é o nível d'água medido no tempo t e Ho o nível d'água no tempo t0, inicial). As informações coletadas em campo devem ser plotadas em gráfico monologarítmico, conforme mostrado na Figura 6.

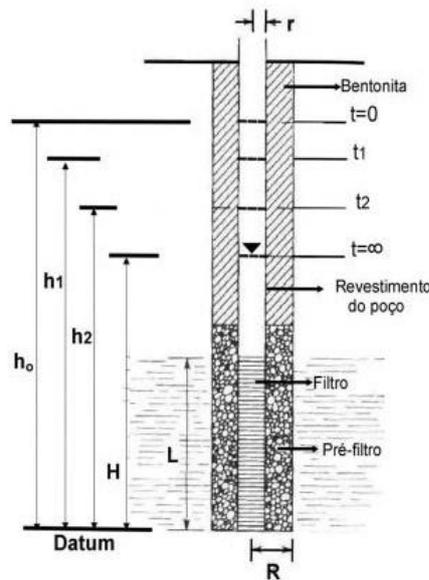


Figura 5 – Geometria do poço para interpretação usando o método de Hvorslev
Figure 5 – Well geometry to interpretation using Hvorslev method

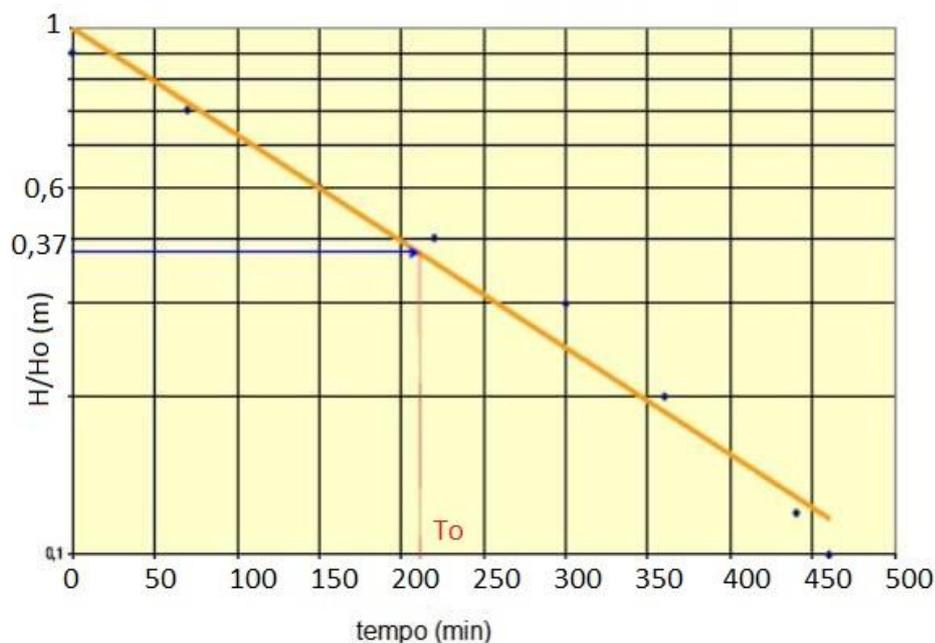


Figura 6 – Exemplo de informações coletadas e plotadas em gráfico com escala semilogaritmica
Figure 6 – Example of informations collected and plotted on semi-logarithmic graph scale

No gráfico, os valores de da razão de rebaixamento (H/H_0) são plotados em escala logarítmica e o tempo t (min.) em escala normal. O método de Hvorslev (1951) é baseado no cálculo da inclinação da reta, observando-se o tempo quando $H/H_0 = 0,368$ ($\ln = -1$). Para Hvorslev (1951) este é definido como tempo de resposta básico, denominado T_0 . Como no início do ensaio $H/H_0 = 1$ ($\log 1 = 0$) e $t=0$, a inclinação da reta, é dada por $\log 0,368/T_0$ que, escrita em termos de logaritmo natural, torna-se

$$-1/T_0.$$

Sendo assim, na reta obtida pela interpolação dos pontos, deve-se ler no eixo do tempo o tempo correspondente a 37 % do rebaixamento/recuperação, que corresponde ao T_0 , tempo de resposta básico. O melhor ajuste da reta deve ser para valores de carga normalizada entre 0,15 e 0,25 (BUTLER, 1997). Após a leitura no gráfico, o valor deve ser substituído na Equação 1.

Segundo Fetter (2001), para análise de aquíferos livres, a solução mais utilizada refere-se aos piezômetros onde o comprimento do filtro é oito vezes maior que o raio do poço ($L_w/R > 8$), condição esta normalmente encontrada nos poços de monitoramento.

No método de Bower & Rice (1976), o cálculo é baseado na equação de Thiem para fluxo sob regime permanente (THIEM, 1906), utilizando um raio efetivo R_e , para a distância na qual a diferença de carga entre o nível d'água do aquífero e o nível d'água no poço é dissipada.

No método de Bower & Rice (1976), o aquífero pode ser livre ou confinado (na condição que o topo do filtro deve estar a uma distancia razoável do fundo do aquífero inferior), extensão praticamente infinita, homogêneo, isotrópico, espessura uniforme, o nível de água é horizontal, a mudança de carga é instantânea; e o poço pode ser total ou parcialmente penetrante; o volume de água contida não é desprezível; os poços devem ter filtro aberto e água no filtro.

Considera no cálculo a geometria de perfuração e do poço (comprimento da seção filtrante, raio da perfuração, raio do revestimento). A Figura 7 ilustra a geometria do poço para a interpretação do ensaio a partir das Equações 2, 3 (poços totalmente penetrantes, quando $L_w = D$) e 4 (poços parcialmente penetrantes, quando $L_w < D$).

$$K = \frac{r^2 \ln\left(\frac{R_e}{R}\right)}{2Le} \times \frac{1}{t} \times \ln\left[\frac{H_0}{Ht}\right] \quad (\text{Equação 2})$$

$$\ln \frac{R_e}{R} = \left[\frac{1,1}{\ln(L_w/R)} + \frac{A + B \ln[(D - L_w)/R]}{L_e/R} \right] - 1 \quad (\text{Equação 3})$$

$$\ln \frac{R_e}{R} = \left[\frac{1,1}{\ln(L_w/R)} + \frac{C}{L_e/R} \right] - 1 \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:
K = condutividade hidráulica [L/T]
r = raio do poço [L]
R = raio da perfuração [L]
Re = distância radial efetiva em que a carga é dissipada [L]
Le = comprimento da seção filtrante [L]

Lw = espessura saturada atravessada pelo poço [L]
Ho = rebaixamento em t = 0 [L]
Ht = rebaixamento em t = t [L]
D = distância entre o nível da água e a base do aquífero [L]
A, B e C = coeficientes adimensionais, função L/rw

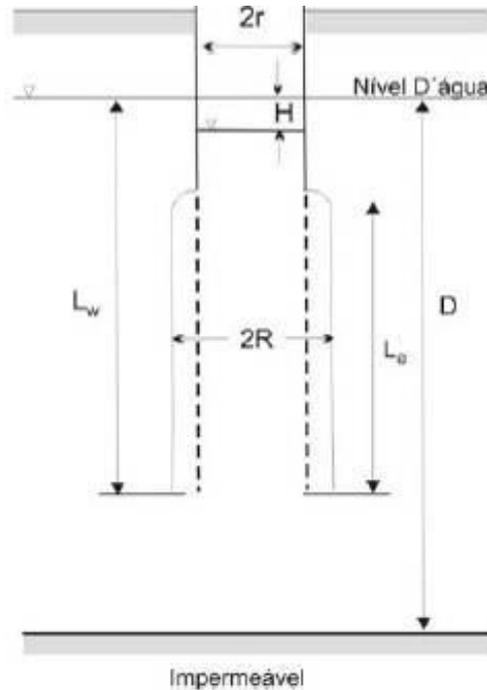


Figura 7 – Geometria do poço para interpretação usando o método de Bower & Rice
Figure 7 – Well geometry to interpretation using Bower & Rice method

No método de Bower & Rice (1976) é considerado que o pré-filtro ou zonas desenvolvidas drenam instantaneamente, mas muitos pré-filtros ou zonas desenvolvidas não são suficientemente permeáveis para garantir a drenagem instantânea.

Para litologias de baixa permeabilidade, alguns autores (PALMER & PAUL, 1987; FETTER, 2001) consideram o comprimento do filtro Le o comprimento total do pré-filtro. Segundo Butler (1997), para poços instalados nessas situações, a porção do pré-filtro acima do filtro é de difícil desenvolvimento por bombeamento ou pistoneamento. Portanto, deve-se considerar Le somente o comprimento do filtro saturado.

Segundo Bouwer (1989) em poços de monitoramento, onde a coluna de filtros é parcialmente submersa, podem ocorrer, também, fluxos de água através do pré-filtro durante o ensaio, ou *double straight line effect*. Para a correção do resultado o autor sugere que seja analisada apenas a reta em que representa fluxos não perturbados do aquífero para o poço.

O método apresenta avanços em relação ao de Hvorslev, pois considera a geometria do trecho perfurado, o pré-filtro, a espessura saturada finita e a distância radial efetiva, na qual o rebaixamento inicial é dissipado. Entretanto, os problemas relativos à não consideração dos efeitos de compressibilidade do aquífero permanecem da mesma forma que no método de Hvorslev.

Já o efeito do desenvolvimento do poço (efeito *skin*) no ensaio de *Slug Test* foi analisado por Yang & Gates (1997) que mostraram através de simulações numéricas e testes de campo, que esse efeito pode ser minimizado durante a análise do ensaio, usando-se os valores finais de carga hidráulica normalizada (H/H_0) versus tempo (t) plotados em gráfico.

Neste trabalho, os resultados foram interpretados utilizando-se o software *Aquifer Test Pro* (versão 2010.1). Esse software é usado para análises gráficas de dados de ensaios de bombeamento e *Slug Test*. É simples de ser utilizado e calcula os valores da condutividade hidráulica pelos méto-

dos de Horslev (1951), Bower & Rice (1976), dentre outros.

RESULTADOS

A área de estudo apresenta perfil geológico-geotécnico típico caracterizado por uma camada de aterro com entulhos (0 a 5 m), seguida de aluvião (2 a 7 m), linha de seixos em algumas áreas (1 a 7 m), solo residual (0,5 a 12 m) e solo de alteração de rocha (a partir de 12 a 18 m).

O arranjo espacial das camadas no local, constituído por materiais argilosos e intercalações com camadas arenosas, constitui aquífero genericamente livre, porém com porções confinadas, que são denotadas pela existência de dois diferentes níveis de água em uma mesma sondagem em

vários pontos investigados.

A Figura 8 apresenta uma seção geológico-geotécnica típica da área de estudo (Seção B-B'), posicionada em planta na Figura 3.

Os ensaios foram realizados atendendo-se às diferentes litologias, sendo os resultados interpretados pelos métodos de Hvorslev (1951) e Bower & Rice (1976). Observou-se que os resultados obtidos foram semelhantes para ambos os métodos. Tal semelhança pode estar diretamente relacionada ao fato de que os poços de monitoramento, durante os ensaios, não sofreram o efeito de infiltração através da parede do pré-filtro, pois todos os poços ensaiados apresentavam filtros completamente submersos. A Tabela 2 ilustra os valores calculados dos parâmetros necessários para a utilização dos métodos.

Tabela 2 – Dados de entrada utilizados nos cálculos de Horslev e Bower & Rice

Table 2 - Input data used on calculations of Horslev e Bower & Rice

Poço	R (m) raio da perfuração	r (m) raio da instalação	L (m) espessura da seção filtrante	b (m) espessura saturada no poço
PM-05	0,0889	0,0254	2	2,3
PM-10	0,1016	0,0254	1	1,3
PM-14A	0,0762	0,0254	1	4,1
PM-14B	0,0762	0,0254	1	11,2
PM-15A	0,0889	0,0254	1	3,7
PM-16	0,0508	0,0254	1	3,7
PM-17	0,0508	0,0254	1	2,7
PM-18A	0,1016	0,0254	1	1,8
PM-19B	0,0508	0,0254	1	12,8
PM-20A	0,0508	0,0254	1	2,66
PM-20B	0,0508	0,0254	1	8,6
PM-21A	0,0508	0,0254	1	2,9
PM-21B	0,0508	0,0254	1	8,04
PM-23A	0,0762	0,0254	1	3,6
PM-23B	0,0762	0,0254	1	14,2
PM-25B	0,0762	0,0254	1	11,2
PM-26	0,0762	0,0254	2	6,9
PM-28B	0,0762	0,0254	1	8,6
PM-29	0,0762	0,0254	3	10,1

Determinação da condutividade hidráulica de uma área contaminada no município de Santo André utilizando-se método Slug Test

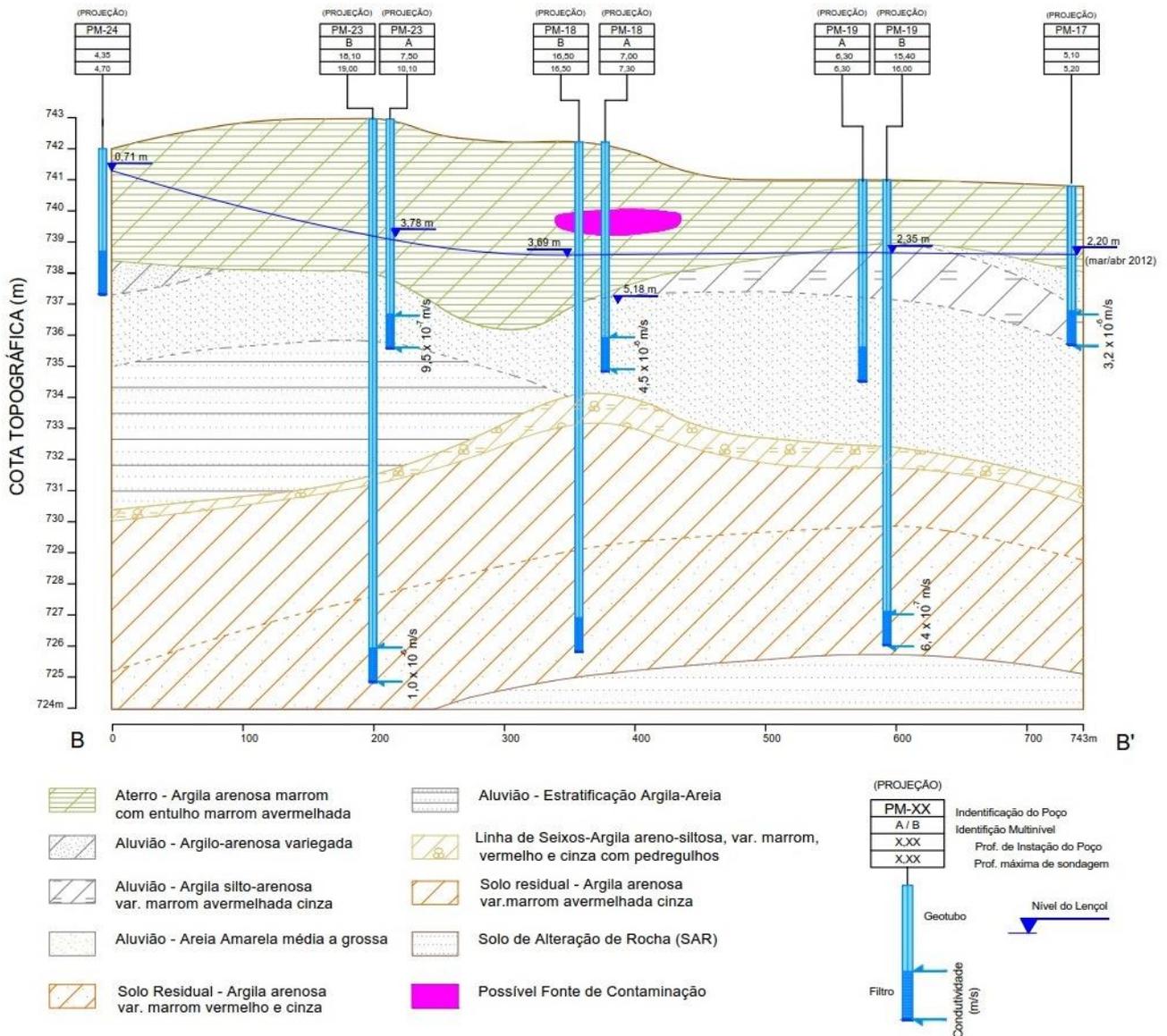


Figura 8 – Descrição geológico-geotécnica da seção B-B', com a projeção dos poços e seus respectivos perfis construtivos

Figure 8 – Geological and geotechnical description from cross-section B-B', with the projection of wells

Ressalta-se que, devido à realização de replicagem de ensaios em oito poços, interpretação por meio de mais de um método, e ensaios de rebaixamento e recuperação em todos os poços, o cálculo da média da condutividade hidráulica por poço foi feito por média geométrica, como proposto por Fetter (2001). Para esse autor, quando a condutividade hidráulica varia mais de duas ordens de grandeza, o uso da média aritmética reflete os valores de maior condutividade e, portanto, a média geométrica seria mais representativa da

condutividade hidráulica de uma unidade hidrogeológica.

As Tabelas de 3 a 5 apresentam os valores obtidos de condutividade hidráulica separadamente para cada método e cada tipo de ensaio, além dos valores médios. A Figura 9 ilustra a localização dos poços e isovalores de condutividade hidráulica para o aquífero freático e a Figura 10 ilustra os valores médios de condutividade hidráulica para cada poço, correspondendo à porção ensaiada.

Tabela 3 – Valores de condutividade hidráulica do ensaio de rebaixamento obtidas pelos métodos de Horslev e Bower & Rice com a utilização do software *Aquifer Test***Table 3** – Hydraulic conductivity values from drawdown test obtained from de Horslev e Bower & Rice methods using *Aquifer Test* software

Poço	K (m/s) Rebaixamento (Aquifer Test - Hvorslev)				K (m/s) Rebaixamento (Aquifer Test - Bower&Rice)				MÉDIA - K (m/s)
	1	2	3	MÉDIA	1	2	3	MÉDIA	
PM-05	4,71E-07	4,65E-07	ni	4,7E-07	3,15E-07	3,11E-07	ni	3,1E-07	3,827E-07
PM-10	2,99E-06	ni	ni	3E-06	1,91E-06	ni	ni	1,9E-06	2,39E-06
PM-14A	2,23E-05	ni	ni	2,2E-05	1,74E-05	ni	ni	1,7E-05	1,97E-05
PM-14B	3,05E-07	ni	ni	3,1E-07	2,63E-07	ni	ni	2,6E-07	2,832E-07
PM-15A	1,34E-07	ni	ni	1,3E-07	1,03E-07	ni	ni	1E-07	1,175E-07
PM-16	3,26E-06	ni	ni	3,3E-06	2,51E-06	ni	ni	2,5E-06	2,861E-06
PM-17	3,50E-06	3,55E-06	ni	3,5E-06	2,59E-06	2,63E-06	ni	2,6E-06	3,033E-06
PM-18A	1,81E-05	ni	ni	1,8E-05	1,26E-05	ni	ni	1,3E-05	1,51E-05
PM-19B	6,58E-07	7,10E-07	ni	6,8E-07	5,78E-07	6,23E-07	ni	6E-07	6,404E-07
PM-20A	7,61E-06	ni	ni	7,6E-06	5,62E-06	ni	ni	5,6E-06	6,54E-06
PM-20B	4,58E-07	ni	ni	4,6E-07	3,86E-07	ni	ni	3,9E-07	4,205E-07
PM-21A	2,69E-06	ni	ni	2,7E-06	2,00E-06	ni	ni	2E-06	2,319E-06
PM-21B	2,83E-06	ni	ni	2,8E-06	2,27E-06	ni	ni	2,3E-06	2,535E-06
PM-23A	5,79E-07	2,24E-06	ni	1,1E-06	4,41E-07	1,71E-06	ni	8,7E-07	9,945E-07
PM-23B	5,39E-07	6,75E-07	ni	6E-07	4,78E-07	5,97E-07	ni	5,3E-07	5,676E-07
PM-25B	2,74E-06	ni	ni	2,7E-06	2,37E-06	ni	ni	2,4E-06	2,548E-06
PM-26	1,26E-06	9,67E-07	ni	1,1E-06	1,07E-06	ni	ni	1,1E-06	1,087E-06
PM-28B	7,99E-08	ni	ni	8E-08	6,80E-08	ni	ni	6,8E-08	7,371E-08
PM-29	2,23E-07	ni	ni	2,2E-07	1,73E-07	ni	ni	1,7E-07	1,964E-07

ni: não possui a informação.

Tabela 4 – Valores de condutividade hidráulica do ensaio de recuperação obtidas pelos métodos de Horslev e Bower & Rice a partir do software *Aquifer Test*

Table 4 - Hydraulic conductivity values from recovery test obtained from de Horslev e Bower & Rice methods using *Aquifer Test* software

Poço	K (m/s) Recuperação (AT - Horslev)				K (m/s) Recuperação (AT - Bower&Rice)			MÉDIA K (m/s)
	1	2	3	MÉDIA	1	2	MÉDIA	
PM-05	1,9E-07	3,73E-07	ni	2,82E-07	2,66E-07	2,5E-07	1,78E-07	2,18E-07
PM-10	4,74E-06	ni	ni	4,74E-06	4,74E-06	ni	3,04E-06	3,8E-06
PM-14A	2,16E-06	ni	ni	2,16E-06	2,16E-06	ni	1,69E-06	1,91E-06
PM-14B	4,07E-07	ni	ni	4,07E-07	4,07E-07	ni	3,52E-07	3,79E-07
PM-15A	4,2E-08	ni	ni	4,2E-08	4,2E-08	ni	3,23E-08	3,68E-08
PM-16	5,94E-06	ni	ni	5,94E-06	5,94E-06	ni	4,58E-06	5,22E-06
PM-17	2,88E-06	4,91E-06	ni	3,9E-06	3,76E-06	3,6E-06	2,9E-06	3,3E-06
PM-18A	1,62E-06	ni	ni	1,62E-06	1,62E-06	ni	1,13E-06	1,35E-06
PM-19B	7,9E-07	5,82E-07	ni	6,86E-07	6,78E-07	5,1E-07	5,96E-07	6,35E-07
PM-20A	4,33E-06	ni	ni	4,33E-06	4,33E-06	ni	3,2E-06	3,72E-06
PM-20B	6,01E-07	ni	ni	6,01E-07	6,01E-07	ni	5,06E-07	5,51E-07
PM-21A	1,22E-06	2,15E-05	ni	1,14E-05	1,14E-05	1,6E-05	8,45E-06	9,8E-06
PM-21B	2,79E-06	ni	ni	2,79E-06	2,79E-06	ni	2,23E-06	2,49E-06
PM-23A	1,33E-06	8,24E-07	ni	1,08E-06	1,05E-06	6,3E-07	7,96E-07	9,13E-07
PM-23B	1,73E-06	2,1E-06	ni	1,92E-06	1,91E-06	1,9E-06	1,69E-06	1,79E-06
PM-25B	1,85E-06	ni	ni	1,85E-06	1,85E-06	ni	1,6E-06	1,72E-06
PM-26	1,71E-06	9,67E-07	4,32E-07	1,04E-06	8,94E-07	ni	1,46E-06	1,14E-06
PM-28B	9,82E-08	ni	ni	9,82E-08	9,82E-08	ni	8,36E-08	9,06E-08
PM-29	2,01E-07	ni	ni	2,01E-07	2,01E-07	ni	1,56E-07	1,77E-07

ni: não possui a informação.

Tabela 5 – Resumo dos valores de condutividade hidráulica considerados para as diferentes características litológicas

Table 5 - Summary of hydraulic conductivity values considered for different layers

K (m/s)	Aterro	Aluvião	Seixos	Residual	Solo de Alteração de Rocha
Média	4,76E-06	3,3E-06	2,51E-06	9,03E-07	2,56E-07
Mediana	-	3,51E-06	-	8,23E-07	-
Máximo	-	6,13E-06	-	2,09E-06	3,27E-07
Mínimo	-	6,57E-08	-	8,17E-08	1,86E-07

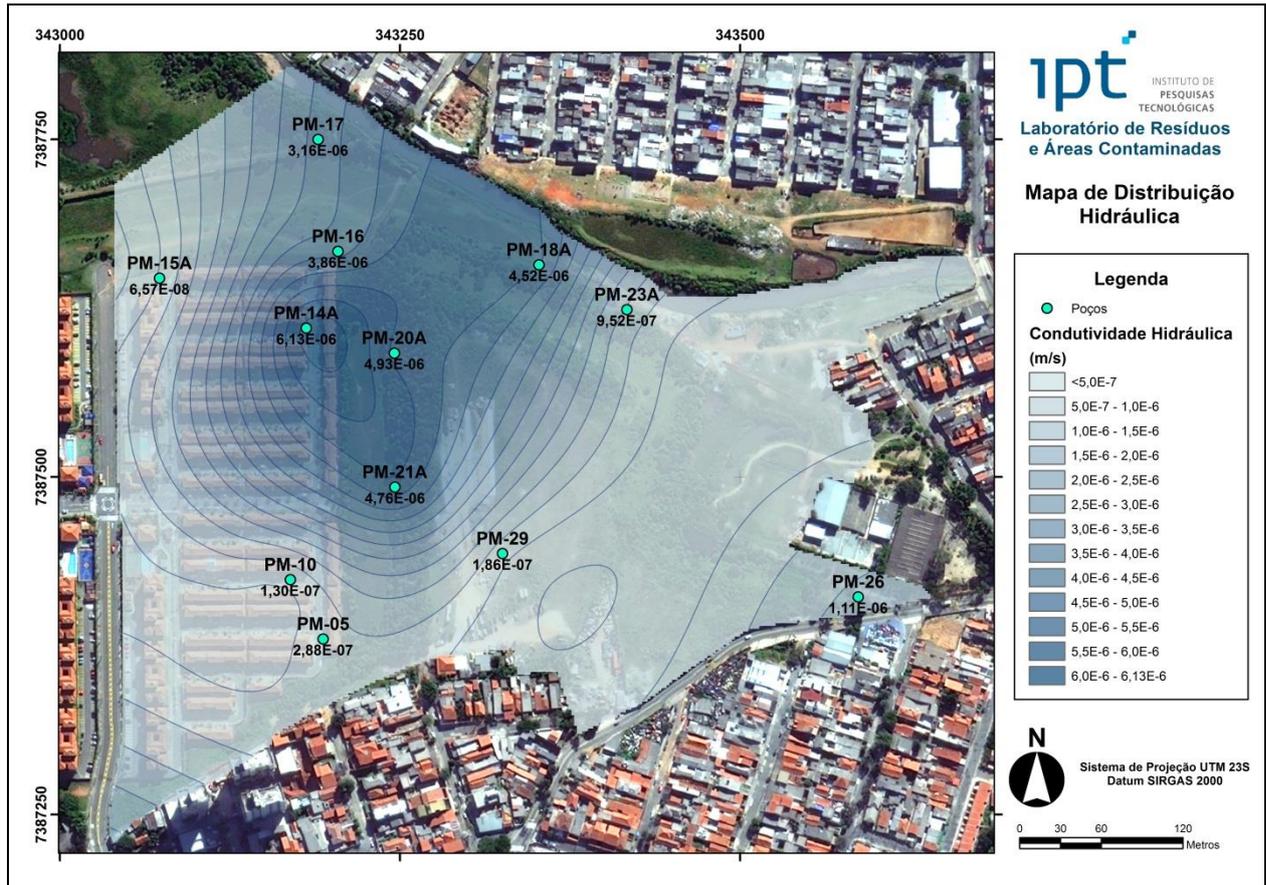


Figura 9 – Valores de condutividade hidráulica em m/s obtidos *in situ*
Figure 9 – Hydraulic conductivity values (m/s) obtained *in situ*

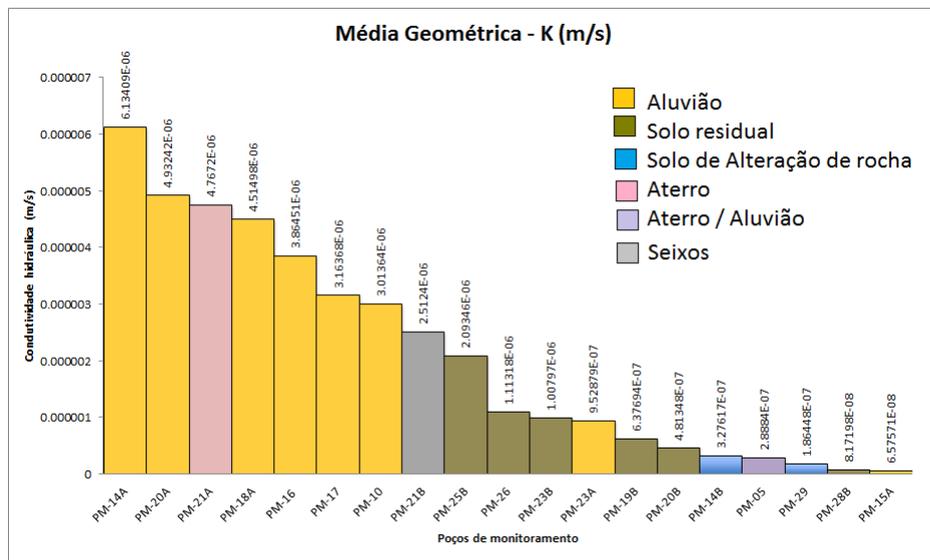


Figura 10 – Valores médios de condutividade hidráulica obtidos nos poços ensaiados
Figure 10 – Average values of hydraulic conductivity obtained from wells

Foram realizados ensaios em 8 poços que encontram-se apenas no aluvião, 6 poços apenas no solo residual, 2 apenas em solo de alteração de rocha, 1 apenas no aterro, 1 na porção de seixos, e 1 cuja a porção filtrante encontra-se em mais de

um tipo de camada litológica, conforme descrito na Tabela 1.

A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que os valores de condutividade hidráulica do solo caracterizado por aluvião variou de

6,13E-6 m.s⁻¹ a 6,57E-8 m.s⁻¹, sendo que a média e a mediana foram de 3,33E-6 m.s⁻¹ a 3,51E-6 m.s⁻¹, respectivamente. Para o solo caracterizado como residual, os valores de condutividade hidráulica variaram de 2,09E-6 m.s⁻¹ a 8,17E-8 m.s⁻¹, sendo que a média e a mediana foram de 9,03E-7 m.s⁻¹ a 8,23E-7 m.s⁻¹, respectivamente. O aterro ficou na ordem de grandeza de 4,76E-06 m.s⁻¹ e o SAR com valor médio de 2,56E-7 m.s⁻¹.

CONCLUSÕES

O aquífero presente na área estudada, na Região Metropolitana de São Paulo, apresenta características de um aquífero heterogêneo, com composição definida por camadas litológicas variadas (aluvião, seixos, solo residual, aterro e solo de alteração de rocha), apresentando-se em condição livre a semiconfinada e com presença de contaminação por compostos organoclorados oriundos de atividade industrial.

Os resultados foram semelhantes para

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos técnicos dos Laboratórios de Resíduos e Áreas Contaminadas (LRAC) e de Recursos Hídricos e Avaliação Geoambiental (LabGEO) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e também pelo auxílio financeiro fornecido pelo Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) e pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE).

REFERÊNCIAS

- BOUWER, H. H. 1989. The Bouwer and Rice slug test - An update. **Ground Water**. v. 27, no. 3, pp. 304-309.
- BOUWER, H. & RICE, R. C. (1976). A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. **Water Resources Research**, 12(3): 423-428.
- BUTLER, J. J., C. D. MCELWEE, AND Z. HYDER. 1993. **Slug tests in unconfined aquifers**. Kansas Geological Survey, Univ. of Kansas. Rpt. No. G2020-06. 67 pp.
- BUTLER, J.J.Jr. (1997). **The design, performance, and analysis of slug tests**. Lewis Publishers, London. 252p.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Parecer nº 004/87. Sobre a disposição dos resíduos gerados nas escavações da retificação do leito do córrego dos Meninos na propriedade das Indústrias Reunidas Matarazzo. São Paulo: CETESB, 1987.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Relatório de Estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo. Dorothy C. P. Casarini [et al]. 73p. São Paulo-SP, CETESB, 2001, atualizado em 2005.
- COOPER, H. H. Jr.; BREDEHOEFT, J.D.; PAPADOPULOS, I.S. Response of a finite diameter well to an instantaneous charge of water. **Water Resources Research**. 3 (1): 263-269, 1967.
- CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Projeto Integração Geológica - Metalogenética Folha Rio de Janeiro Carta Geológica. São Paulo: CPRM, 1999. (Escala 1:250.000).
- FETTER, C.W. (2001) **Applied hydrogeology**. 4a ed. New Jersey, Prentice Hall Merrill Publishing Company. 598 p.
- FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. 1979. **Groundwater**. Englewood Cliffs, New Jersey.
- HVORSLEV, M.J. (1951) **Time lag and soil permeability in ground water observations**. U.S. Army Corps of Engineers Waterway Experimentation Station, Bulletin 36.
- PALMER, C.D.; PAUL, D.G (1987). Problems in the interpretation of slug test data from fine-grained tills. In: Proc. NWWA FOCUS Conf. Northwestern Ground Water Issues, National Water Well Association.
- PEDE, M.A.Z. (2004). **Caracterização da Condutividade Hidráulica do embasamento cristalino alterado saturado na Região Metropolitana de São Paulo**. 2004. 95 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 106 p.

ROHRICH, THOMAS & WATERLOO HYDROGEOLOGIC, INCORPORATED (2002). **Aquifertest Pro User's Manual**: Graphical Analysis and Reporting of Pumping & Slug Test Data. 270 pg.

THIEM, G. **Hydrologische methoden**. Leipzig: Gebhardt, 1906. 56 p.

YANG, Y.J.; GATES, T.M. Wellbore skin effect in slug-test data analysis for lowpermeability geologic materials. **Ground Water**, vol. 35, n. 6, p. 931-937.1997.

ZLOTNIK, V.A., MCGUIRE, V.L., 1998. **Multi-level slug tests in highly permeable formations**: 1 modification of the Springer-Gelhar (SG) model. *Journal of Hydrology* 204, 271-282.