

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM POÇOS DE MONITORAMENTO NA LINHA 2 DO METRÔ DE SÃO PAULO - COMPARAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS

Mateus Hcristos LEPTOKARYDIS¹; Ana Elisa Silva de ABREU ²

Resumo – A determinação precisa da condutividade hidráulica (K) é essencial para prever riscos e projetar obras subterrâneas em áreas densamente urbanizadas, como no caso da expansão da Linha 2 – Verde do Metrô de São Paulo. Neste trabalho, comparam-se dois métodos de cálculo de condutividade hidráulica (K) – Hvorslev (1951) e Bouwer & Rice (1976) – aplicados em 113 poços de monitoramento. A região estudada abrange o embasamento cristalino (saprólito e solo residual) e sedimentos paleógenos (Formações São Paulo e Resende) da Bacia de São Paulo. Os resultados apontaram valores médios de K coerentes com a literatura, variando entre 10^{-7} a 10^{-3} cm/s em função da heterogeneidade litológica e do método de cálculo adotado. Em geral, Bouwer & Rice fornece valores ligeiramente maiores que Hvorslev, com discrepâncias que chegam em até uma ordem de grandeza. A comparação por meio de uma razão entre os valores indica que esses desvios estão relacionados, sobretudo, às diferenças no ajuste gráfico do rebaixamento e às condições práticas de injeção de água no poço. Conclui-se que a escolha do método de interpretação e o controle rigoroso das condições de ensaio são fundamentais para reduzir incertezas em projetos de escavação subterrânea na RMSP.

Abstract – Accurate estimation of hydraulic conductivity (K) is essential for predicting risks and designing underground works in densely urbanized areas, as in the case of the expansion of São Paulo Metro's Line 2 – Green. In this study, two Slug Test interpretation methods—Hvorslev (1951) and Bouwer & Rice (1976)—are compared, based on 113 monitoring wells. The area under investigation comprises the crystalline basement (saprolite and residual soil) and Paleogene sediments (São Paulo and Resende Formations) of the São Paulo Basin. The results showed mean K values consistent with the literature, ranging from 10^{-7} to 10^{-3} cm/s depending on lithological heterogeneity and the adopted calculation method. Overall, Bouwer & Rice yielded slightly higher values than Hvorslev, with discrepancies reaching up to one order of magnitude. A comparative ratio of the values indicates that these deviations are primarily associated with differences in the graphical fitting of drawdown data and the practical conditions under which water is injected into the well. It is concluded that the choice of interpretation method and strict control of testing conditions are crucial for reducing uncertainties in underground excavation projects within the RMSP (São Paulo Metropolitan Region).

Palavras-Chave – Condutividade Hidráulica; Hvorslev; Bouwer & Rice

¹ Geól., Universidade Estadual de Campinas, (11) 9.9779-4539, hcristosm@gmail.com

² Eng. Geól. PhD, Universidade Estadual de Campinas, aeabreu@unicamp.br

1. INTRODUÇÃO

A expansão do sistema metroviário na cidade de São Paulo, especialmente no contexto da Linha 2 – Verde, envolve a perfuração de túneis e a construção de estruturas subterrâneas em um terreno caracterizado por elevada complexidade geológica. A região abrange o embasamento cristalino pré-cambriano e os sedimentos paleógenos da Bacia de São Paulo, além de coberturas quaternárias em setores mais superficiais (Monteiro et al., 2012; Gurgueira, 2013).

Dentre as propriedades hidrogeológicas, a condutividade hidráulica (K) é fundamental para avaliar riscos de inundação, projetar sistemas de drenagem e prever potenciais rebaixamentos de aquíferos em canteiros de obras urbanas (Fetter, 2001). Para a determinação de K , o ensaio de Slug Test destaca-se por ser relativamente rápido e aplicável a piezômetros de pequeno diâmetro (ABGE, 2013). Contudo, a interpretação dos dados pode ser feita por diferentes métodos, sendo Hvorslev (1951) e Bouwer & Rice (1976) dois dos mais adotados.

A literatura (Pede, 2004; Ribeiro, 2021) sugere que resultados podem variar entre esses dois métodos em função de diferenças conceituais e práticas, como suposições de fluxo radial vs. linear, ajustes gráficos de rebaixamento e heterogeneidade das formações geológicas. Assim, a presente pesquisa compara as estimativas de condutividade hidráulica geradas pelos métodos Hvorslev e Bouwer & Rice em poços distribuídos ao longo do traçado planejado da Linha 2 – Verde, indicando onde e por que ocorrem maiores divergências.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

2.1. Localização e Contexto

A área de estudo compreende treze pontos situados na Zona Leste do município de São Paulo, região de influência da futura expansão da Linha 2 – Verde, com possibilidade de interligar o centro à zona limítrofe de Guarulhos, conforme ilustra a Figura 1. Trata-se de uma área densamente urbanizada, caracterizada por topografia de morros arredondados e drenagem afluyente do Rio Tietê (Rodriguez, 1998).

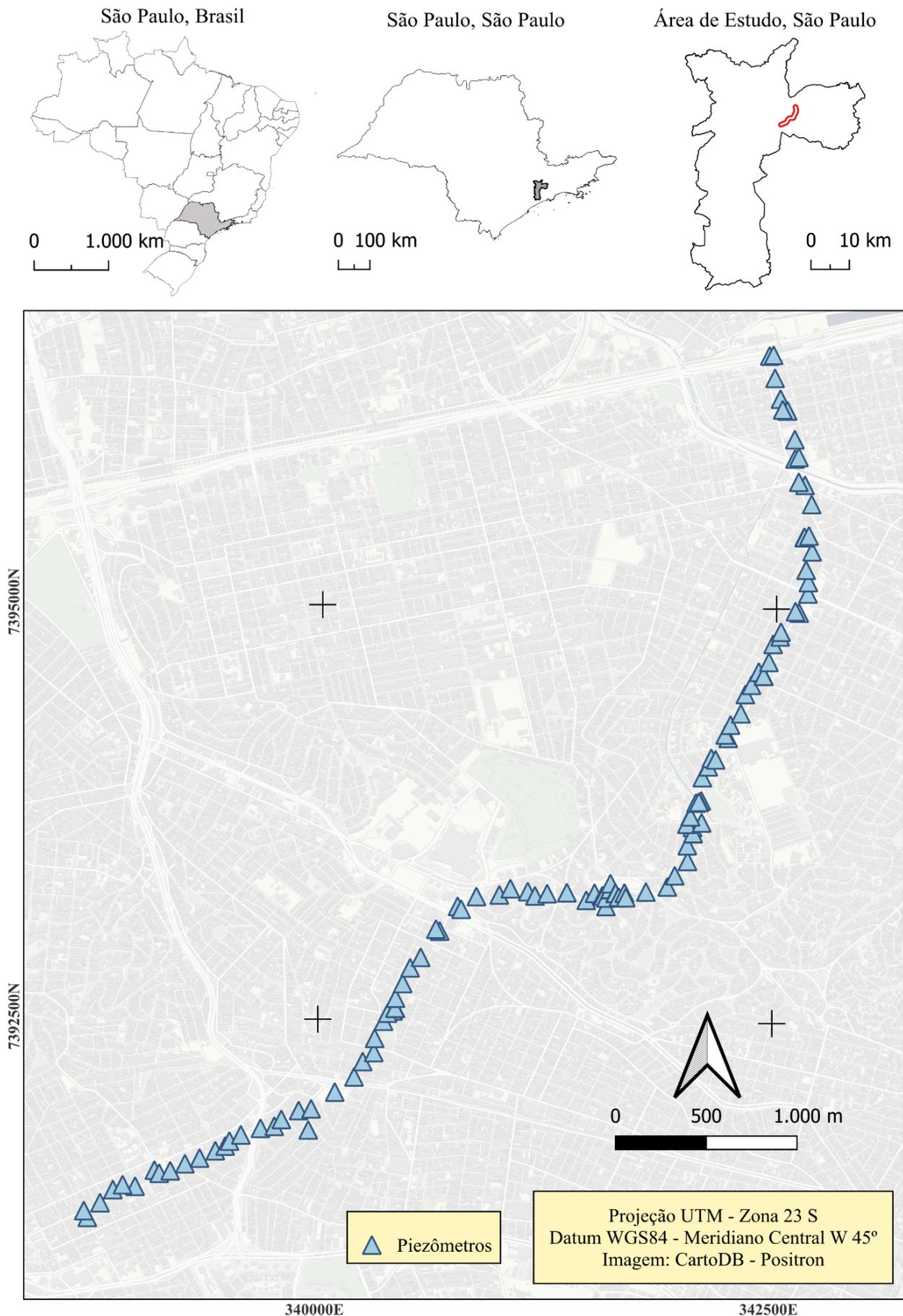


Figura 1. Área de estudo e posição de piezômetros (PZs) instalados. Base de dados: CartoDB - Positron, CMSP - Companhia do Metropolitano de São Paulo.

2.2. Geologia Regional e Contexto Estrutural

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) está inserida em um arcabouço geotectônico vinculado à Província Mantiqueira, cujos eventos orogênicos remontam ao Neoproterozóico e resultaram em rochas metamórficas de médio a alto grau (gneisses e xistos), além de granitos e migmatitos (Fernandes, 1991; Hasui, 2010). Essas litologias compõem o chamado embasamento pré-cambriano, caracterizado por feições estruturais complexas, como zonas de cisalhamento e falhamentos transcorrentes, que influenciam diretamente na compartimentação geológica regional.

Sobre esse embasamento depositaram-se os sedimentos do Rift Continental do Sudeste do Brasil, formando a Bacia de São Paulo (Riccomini, 1989). Nela se destaca a atuação de fases distensivas e transcorrentes que controlaram o regime sedimentar ao longo do Cenozoico. Entre as principais unidades estratigráficas, encontra-se a Formação Resende, formada por arenitos e argilitos de ambientes fluviais entrelaçados e leques aluviais, e a Formação São Paulo, composta por litofácies arenosas e argilosas típicas de sistemas fluviais meandrantas, com intercalações pontuais de argilitos avermelhados e arenitos de coloração cinza-amarelada (Gurgueira, 2013). Essas formações são cobertas localmente por depósitos quaternários, que podem incluir colúvios e aluviões em áreas de baixas cotas. Essa configuração tectônica e estratigráfica complexa é fundamental para a compreensão dos aspectos hidrogeológicos da RMSP, uma vez que cada unidade apresenta propriedades físico-hidráulicas distintas, tanto em termos de permeabilidade quanto de anisotropias geradas pelos esforços tectônicos pretéritos.

2.3. Hidrogeologia

A configuração hidrogeológica da região estudada é fortemente condicionada pela heterogeneidade das unidades geológicas que a compõem, bem como pelo histórico tectônico de falhas e fraturas associadas ao embasamento pré-cambriano. No embasamento, a circulação de água subterrânea ocorre principalmente através de fraturas e zonas de intemperismo (saprólito), podendo apresentar comportamento anisotrópico em função da densidade de fraturas e da profundidade de alteração (Hirata e Ferreira, 2001). Em áreas onde o grau de intemperismo é elevado, forma-se um aquífero poroso de limitada espessura, que se sobrepõe à rocha menos alterada ou sã, criando gradientes de fluxo locais que se refletem na variabilidade dos valores de condutividade hidráulica (Monteiro, 2016).

Já nas Formações São Paulo e Resende, o fluxo de água subterrânea tende a ser regido pela granulometria dominante, pela continuidade das camadas arenosas e pelos eventuais corpos argilosos que funcionam como níveis menos permeáveis. Enquanto a Formação Resende exhibe facies fluviais entrelaçadas, com maior participação de areias e conglomerados, a Formação São Paulo, de caráter meandrante, costuma apresentar intercalações mais marcantes de argilas e areias, resultando em comportamento hidrogeológico ainda mais heterogêneo (Gurgueira, 2013). Além disso, os depósitos quaternários, presentes sobretudo nas áreas de várzea, podem atuar como importantes zonas de recarga, caso não estejam completamente impermeabilizados pela urbanização. Esses fatores combinados evidenciam a necessidade de se considerar tanto a natureza fraturada do embasamento quanto a litologia diversa dos sedimentos na caracterização e modelagem dos aquíferos locais.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Base de Dados

A Companhia do Metropolitano de São Paulo (CMSP) disponibilizou dados de instalação e monitoramento de 132 piezômetros, acompanhados de 136 perfis de sondagem e 22 seções geológicas. Após filtrar casos com dados incompletos ou curvas de recuperação anômalas, 113 piezômetros foram efetivamente analisados.

3.2. Métodos de Interpretação do ensaio de recuperação do NA

3.2.1. Hvorslev (1951)

O método supõe meio homogêneo e fluxo radial, calculando-se K pela posição do ponto onde $H_t/H_0=37\%$. Foi aplicada a equação:

$$K = \frac{r^2 \ln\left(\frac{L_p}{R}\right)}{2L_p T_{37}} \quad (1)$$

Onde r, L_p e R são respectivamente o raio do revestimento (cm), o comprimento do filtro (cm) e o raio do poço (cm).

3.2.2. Bouwer & Rice (1976)

Pressupõe fluxo linearizado na porção inicial do rebaixamento, traçando-se uma reta cuja extrapolação define o tempo t até $H=0$. Emprega-se:

$$K = \left[\frac{r^2 \ln\left(\frac{R_e}{R}\right)}{2L_p} \right] \cdot \left(\frac{1}{t}\right) \cdot \left(\frac{H_0}{H_t}\right) \quad (2)$$

Onde r, R_e , t, L_p e R são respectivamente o raio do revestimento (cm), a distância radial efetiva em que a carga é dissipada (cm), o tempo decorrido após $H = 0$ (s), o comprimento do filtro (cm) e o raio do poço (cm).

O cálculo da distância radial efetiva (R_e) não é uma aplicação física possível, conforme apontado. Para superar essa limitação, Bouwer & Rice (1976) propõem um ábaco em forma de gráfico que contém três valores constantes (A, B e C). Esses coeficientes adimensionais (A, B e C) são determinados com base na relação entre L_p (a espessura do aquífero) e R (o raio do poço). Esses coeficientes são essenciais para orientar o uso de equações que permitem a diferenciação entre poços parcialmente penetrantes (por meio da equação 3) e poços totalmente penetrantes (por meio da equação 4).

$$\ln\left(\frac{R_e}{R}\right) = \left[\frac{1,1}{\ln\left(\frac{L_w}{R}\right)} + \left[A + \frac{B \ln(h-L_w)}{R} \right] \frac{L_p}{R} \right]^{-1} \quad (3)$$

Onde A e B são valores constantes adimensionais e tabelados, L_w , L_p e R são respectivamente a distância da superfície da água à base do filtro (cm), o comprimento do filtro (cm) e o raio do poço (cm).

$$\ln\left(\frac{R_e}{R}\right) = \left[\frac{1,1}{\ln\left(\frac{L_w}{R}\right)} + \frac{C}{\frac{L_p}{R}} \right]^{-1} \quad (4)$$

Onde C é um valor constante adimensional e tabelado, L_w , L_p e R são respectivamente a distância da superfície da água à base do filtro (cm), o comprimento do filtro (cm) e o raio do poço (cm).

3.3. Comparação entre os métodos

Para avaliar quantitativamente o grau de discrepância entre os métodos de cálculo da condutividade hidráulica (Bouwer & Rice e Hvorslev), definiu-se um índice adimensional "I", obtido a partir da razão entre os valores de K fornecidos por cada um ($I = K_{\text{Bouwer\&Rice}} / K_{\text{Hvorslev}}$). Como ambos produzem resultados na mesma unidade de medida (cm/s), a divisão gera um número puro, facilitando a interpretação sobre o quanto um método difere do outro. Dessa forma, valores próximos de 1 indicam elevada concordância, enquanto desvios maiores (acima de 1,5 ou menores que 0,5 por exemplo) sugerem discrepâncias significativas na estimativa de permeabilidade.

$$I = \frac{BeR}{Hvorslev} \quad (5)$$

A adoção de I tem como principal função a comparação imediata dos métodos, possibilitando verificar se as diferenças são pontuais ou chegam a ultrapassar uma ordem de

grandeza. Assim, o índice funciona como um critério de avaliação para identificar em quais litologias ou condições de ensaio (por exemplo, alto grau de heterogeneidade ou diferentes tempos de rebaixamento) um dos métodos tende a fornecer valores mais elevados ou subestimados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Distribuição de K nas Diferentes Litologias

Em linhas gerais, observou-se que K variou de 10^{-7} a 10^{-3} cm/s ao longo dos perfis, corroborando estudos prévios sobre a Bacia de São Paulo (Monteiro, 2016; Ribeiro, 2021). A Formação São Paulo, marcada por variação granulométrica (argilas avermelhadas, areias siltosas, etc.), apresentou maior dispersão de valores. Já a Formação Resende exibiu concentrações mais arenosas em certos trechos, resultando em valores de K relativamente altos e menor amplitude de variação. No embasamento, principalmente na transição para o saprólito, foram identificados valores médios de K em torno de 10^{-5} cm/s. No entanto, pontos isolados indicaram condutividade bem menor ($\leq 10^{-7}$ cm/s), associados possivelmente a rochas menos fraturadas ou níveis de alteração mais argilosos (Pede, 2004).

Os valores obtidos para os valores de condutividade hidráulica são ilustrados na Figura 2 que compara os valores de condutividade hidráulica obtidos pelos métodos de Hvorslev (eixo x) e Bouwer & Rice (eixo y) para cada litologia (Formações Resende e São Paulo, além do embasamento). Cada ponto representa um piezômetro, e as cores indicam a formação correspondente.

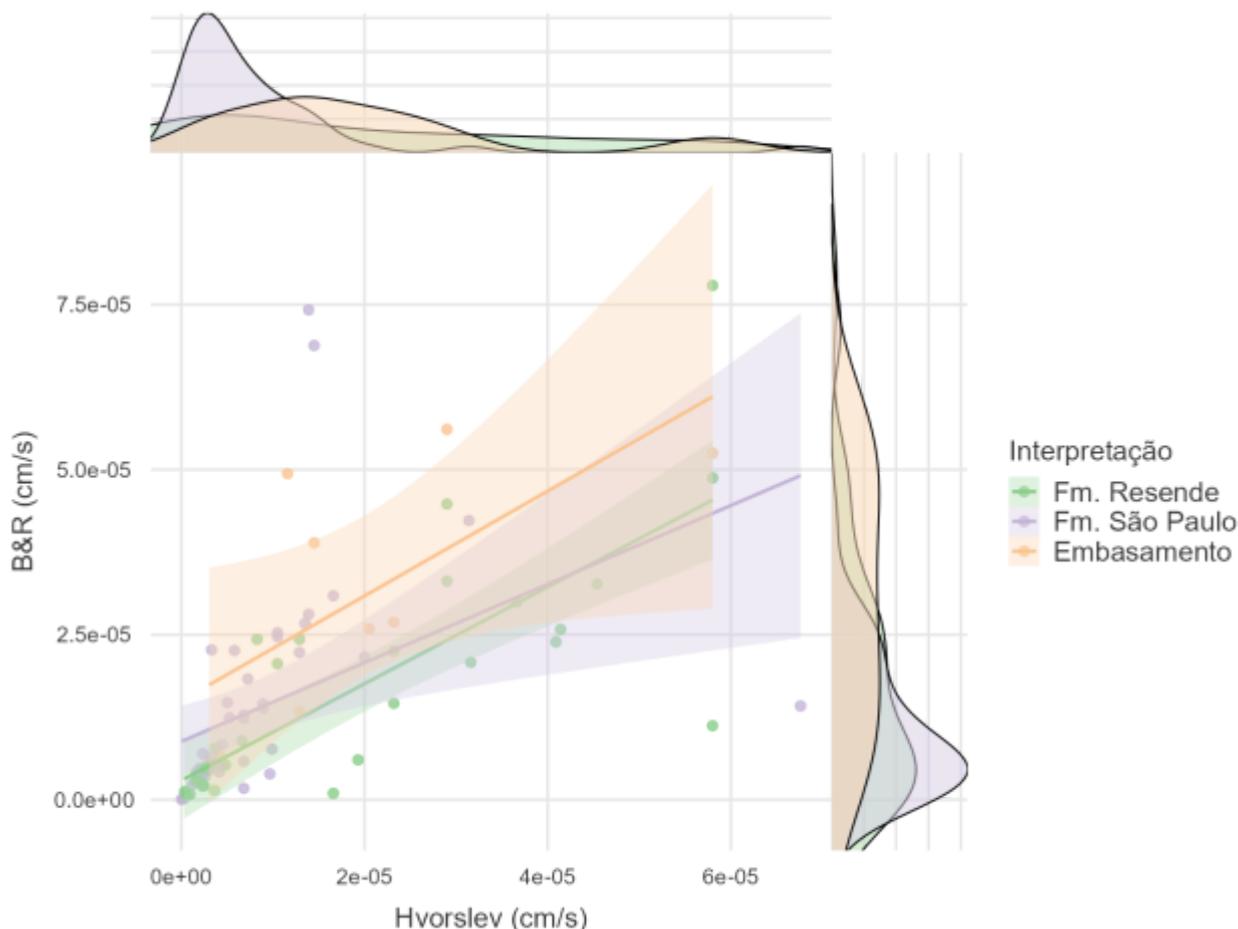


Figura 2. Gráfico de dispersão comparando os valores de condutividade hidráulica (K) obtidos pelos métodos de Hvorslev (eixo x) e Bouwer & Rice (eixo y), diferenciados por litologia (Formações Resende e

São Paulo e Embasamento). As linhas diagonais indicam as retas de regressão, compõem também o centro da área hachurada que indica o erro padrão para cada um dos grupos litológicos.

4.2. Comparação Entre Métodos

4.2.1. Comportamento Geral

Em cerca de 70% dos casos analisados, $K_{BeR} > K_{Hvorslev}$, embora nem sempre superando 1,0 ordem de grandeza. O índice I variou com maior intensidade na Formação São Paulo (até 2,0 ou 2,5 em alguns poços), refletindo a natureza heterogênea (intercalações de areia e argila) e a sensibilidade do método Bouwer & Rice ao ajuste linear do rebaixamento inicial (Ribeiro, 2021).

4.2.2. Formação Resende

Na Formação Resende, valores médios de I próximos de 1,3 foram notados, sugerindo menor discrepância entre os métodos. Uma hipótese plausível é a maior porcentagem de camadas arenosas relativamente contínuas, resultando em comportamento mais previsível do fluxo de água e em curvas de rebaixamento mais facilmente ajustadas (Gurgueira, 2013).

4.2.3. Embasamento Cristalino

Para o embasamento, as diferenças oscilaram entre 1,5 e 2,4 em média (ou seja, 50% a 140% de incremento quando se passa de Hvorslev para Bouwer & Rice). O fator determinante parece ser a presença de fraturas e variações no perfil de alteração, que podem interferir intensamente no início do rebaixamento do poço (Monteiro, 2016).

4.3. Análise de Possíveis Fatores de Influência

Ao analisar as diferenças observadas entre os métodos de interpretação, identificou-se que, em primeiro lugar, o método de execução do Slug Test pode influenciar a curva de rebaixamento. A injeção ou retirada de água sem o uso de um tarugo sólido tende a introduzir um atraso no início do ensaio, alterando a porção inicial do rebaixamento do nível d'água (NA). Em segundo lugar, o ajuste gráfico apresenta diferenças: enquanto o método de Hvorslev (1951) considera o tempo T_{37} (momento em que $H_t/H_0 = 37\%$), o método de Bouwer & Rice (1976) baseia-se em uma extrapolação linear de t até $H=0$, o que gera critérios distintos para definir o tempo principal do ensaio (ABGE, 2013). Por fim, a heterogeneidade e a anisotropia do meio também exercem papel fundamental. Formações como a Formação São Paulo, com intercalações de argila e areia, e o embasamento fraturado exibem respostas mais complexas ao rebaixamento, o que pode levar à subestimativa ou superestimativa de K , dependendo do método aplicado.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos, com faixas de K variando de 10^{-7} a 10^{-3} cm/s, evidenciam a marcante heterogeneidade geológica da Bacia de São Paulo e do embasamento subjacente. As diferenças entre os métodos Bouwer & Rice e Hvorslev mostraram-se mais acentuadas em litologias heterogêneas, especialmente na Formação São Paulo e na zona de intemperismo do embasamento, onde o índice de discrepância (I) chegou a valores de até 2,5. Em contrapartida, na Formação Resende, setores considerados mais homogêneos apresentaram menores discrepâncias, com valores de K relativamente próximos entre as metodologias (I em torno de 1,3). Observa-se, portanto, que a seleção do método de interpretação para obras subterrâneas em áreas urbanas deve levar em conta tanto as características sedimentares (areias versus argilas) quanto possíveis anisotropias por fraturas e o próprio procedimento de Slug Test (uso de tarugo

ou injeção de água). Nesse sentido, recomenda-se a comparação cruzada de ambos os métodos em pontos estratégicos a fim de minimizar incertezas em modelagens hidrogeológicas e no dimensionamento de estruturas de contenção e drenagem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Companhia do Metropolitano de São Paulo e ao METRÔ de São Paulo, pela disponibilização dos dados utilizados, ao Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas.

REFERÊNCIAS

ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. Ensaio de permeabilidade em solos: orientações para sua execução no campo. 4. ed. São Paulo, 2013.

BOUWER, H.; RICE, R. C. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, v.12, n.3, p.423-428, 1976.

FERNANDES, A. J. As unidades regionais do Complexo Embu e seu embasamento no leste do Estado de São Paulo. 1991. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

FETTER, C. W. *Applied Hydrogeology*. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2001. 604 p.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979. 604 p.

GURGUEIRA, M. D. Correlação de dados geológicos e geotécnicos na Bacia de São Paulo. 2013. 80 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

HASUI, Y. A grande colisão pré-cambriana do sudeste brasileiro e a estruturação regional. *Geociências*, v.29, n.2, p.141-169, 2010.

HIRATA, R. C. A.; FERREIRA, L. M. R. Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. *Revista Brasileira de Geociências*, v.31, n.1, p.43-50, 2001.

HIRATA, R. C. A. et al. Hidrogeologia da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. In: *TWIN Cities: Solos das regiões metropolitanas de São Paulo e Curitiba*. São Paulo: ABMS, 2012. p.65-80.

HVORSLEV, M. J. Time lag and soil permeability in groundwater observations. Vicksburg: U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, 1951. (Bulletin, 36).

MONTEIRO, M. D.; GURGUEIRA, M. D.; ROCHA, H. C. Geologia da região metropolitana de São Paulo. In: *TWIN Cities: Solos das regiões metropolitanas de São Paulo e Curitiba*. São Paulo: ABMS, 2012. p.17-46.

MONTEIRO, M. D. Contribuição à caracterização hidrogeológica de maciços fraturados e solos residuais em projetos de obras subterrâneas na RMSP. 2016. 112 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

PEDE, M. A. Z. Caracterização da condutividade hidráulica do embasamento cristalino alterado saturado na RMSP. 2004. 106 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 2004.

RIBEIRO, P. H. B. Condutividade hidráulica dos solos da cidade de São Paulo a partir de ensaios em obras do Metrô. 2021. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2021.

RICCOMINI, C. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. 1989. 256 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

ROCHA, H. C. et al. A nova fase de expansão da Linha 2 – Verde do Metrô de São Paulo, aspectos gerais do projeto básico de engenharia. Brasil Engenharia, n.626, p.1-8, 2015.

RODRIGUEZ, S. K. Geologia urbana da região metropolitana de São Paulo. 1998. 220 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SANDERS, L. L. Manual of Field Hydrogeology. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998. 381 p.