

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Campus de Rio Claro

**CARACTERIZAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO EMBASAMENTO  
CRISTALINO ALTERADO SATURADO NA REGIÃO METROPOLITANA  
DE SÃO PAULO**

**Marco Aurélio Z. Pedre**

**Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang**

Dissertação de Mestrado elaborada junto  
ao Curso de Pós-Graduação em Geociências  
Área de Concentração em Geociências e Meio  
Ambiente, para obtenção do Título de Mestre  
em Geociências.

Rio Claro (SP)  
2004

551.49   Pede, Marco Aurélio Zequim  
P371c       Caracterização da condutividade hidráulica do  
embasamento cristalino alterado saturado na região metropolitana de  
São Paulo / Marco Aurélio Zequim Pede. – Rio Claro : [s.n.], 2004  
95 f. : il., gráfs., tabs., fots., mapas + 1 cd-rom

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Orientador: Chang Hung Kiang

1. Águas subterrâneas. 2. Condutividade hidráulica  
do meio saturado. 3. Testes de *slug*. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela STATI – Biblioteca da UNESP  
Campus de Rio Claro/SP

## **Comissão Examinadora**

Prof. Dr. Chang Hung Kiang (orientador)

Prof. Dr. Everton de Oliveira

Prof. Dr. Gerson Cardoso da Silva Junior

Rio Claro, 28 de abril de 2004

À minha *Famiglia*,

## **Agradecimentos**

Ao Prof. Dr. Chang Hung Kiang pela amizade, orientação e pela confiança depositada.

À Fundação para o Desenvolvimento da UNESP – Fundunesp, pela bolsa concedida.

Ao laboratório de Hidrogeologia e Hidroquímica, em especial ao amigo Dagmar Carnier Neto.

Ao companheiro Geólogo Cláudio Alexandre de Souza pelo empenho na difícil tarefa de obtenção de áreas para realização dos testes.

Aos companheiros da empresa American Drilling do Brasil pelo apoio nos trabalhos de campo.

À HIDROPLAN – Hidrogeologia e Planejamento Ambiental S/C Ltda pelo fornecimento das áreas e incentivo.

Às empresas de consultoria ambiental Arcadis – Hidroambiente e EPA.

Ao Sr. Richard Heathcote, perito do Departamento de Justiça do Estado de Iowa, Estados Unidos, por sua contribuição nas discussões relativas à dissertação.

Aos colegas Andresa Oliva, Alexandre Vidal, Didier Gistmans, Elias Teramoto, Joseli Ferreira e Flávio de Paula e Silva pelo apoio e solidariedade.

À minha esposa Vânia e à minha filha Anna, pela compreensão e incentivo dispensado em toda esta jornada.

## SUMÁRIO

<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>ii</b>
<b>Índice de Tabelas</b> .....	<b>iv</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>v</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>vi</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>01</b>
<b>2. Objetivos</b> .....	<b>03</b>
<b>3. Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>04</b>
3.1 Lei de Darcy .....	04
3.2 Valores de Condutividade Hidráulica .....	07
3.3 Ensaio de Condutividade Hidráulica .....	09
3.3.1 Testes de <i>Slug</i> .....	11
<b>4. Metodologia</b> .....	<b>26</b>
4.1 Levantamento de áreas e trabalhos de Campo .....	26
4.1.1 Seleção das áreas .....	26
4.1.2 Instalação de poços de monitoramento .....	26
4.1.3 Determinação de Condutividade Hidráulica .....	31
<b>5. Caracterização da Área de Estudo</b> .....	<b>37</b>
5.1. Localização .....	37
5.2. Aspectos Climáticos .....	38
5.3. Geomorfologia .....	38
5.4. Contexto Geológico Regional .....	39
5.5. Aspectos Tectônicos e Estruturais .....	44
5.6. Contexto Hidrogeológico da RMSP .....	46
<b>6. Condutividade Hidráulica do Embasamento Cristalino Alterado Saturado</b> .....	<b>50</b>
6.1 Condutividade hidráulica das rochas metassedimentares alteradas saturadas .....	53
6.2 Condutividade hidráulica das rochas granitóides e gnáissicas alteradas saturadas .....	66
6.3 Análise estatística do conjunto total de dados .....	73
<b>7. Conclusões</b> .....	<b>77</b>
<b>8. Referências Bibliográficas</b> .....	<b>79</b>
<b>ANEXO 1</b> .....	<b>84</b>

## Índice de Figuras

Figura 1 – Experimento de Darcy .....	04
Figura 2 – Distribuição global dos aquíferos.....	09
Figura 3 – Desenho esquemático do teste de <i>slug</i> .....	13
Figura 4 – Ilustração esquemática do teste de slug, método de Hvorslev .....	17
Figura 5 – Ilustração esquemática do teste de slug, método de Bower e Rice.....	19
Figura 6 – Valores adimensionais A, B e C .....	21
Figura 7 – Valores de carga hidráulica normalizada <i>versus</i> tempo de teste de <i>slug</i> realizado em poço de monitoramento instalado em Taboão das Serra (SP).....	23
Figura 8 – Valores de carga hidráulica normalizada <i>versus</i> tempo de teste de <i>slug</i> realizado em poço de monitoramento instalado em Mauá (SP) .....	24
Figura 9 – <i>Hollow stem auger</i> .....	27
Figura 10 –Trado manual e tripé .....	28
Figura 11 – Perfil esquemático do poço de monitoramento .....	30
Figura 12 – Poço experimental e tarugo de <i>nylon</i> .....	32
Figura 13 –Transdutor de pressão .....	33
Figura 14 – Tela do <i>software</i> Winslug, apresentando intervalo de análise proposto por Butler (1996) para análise pelo método de Hvorslev (1951) .....	34
Figura 15 – Tela do <i>software</i> Winslug, apresentando intervalo de análise proposto por Butler (1996) para análise pelo método Bower & Rice (1976) .....	35
Figura 16 – Equipamentos utilizados no teste de <i>slug</i> .....	36
Figura 17 – Mapa de localização da área de estudo.....	37
Figura 18 – Precipitação média mensal na RMSP.....	38
Figura 19 – Distribuição das grandes unidades litoestratigráficas da RMSP .....	40
Figura 20 – Mapa de unidades hidrogeológicas.....	47
Figura 21 – Modelo conceitual do aquífero cristalino .....	48
Figura 22 – Áreas avaliadas quanto à condutividade hidráulica do embasamento cristalino alterado saturado.....	51
Figura 23 – Afloramento de xistos e descrição litológica .....	55
Figura 24 – Tela do <i>software</i> Winslug, teste poço TS 29 .....	61
Figura 25 – Movimento oscilatório, teste poço TS 22.....	62
Figura 26 – Histograma e frequência acumulada da condutividade hidráulica das rochas metassedimentares alteradas, segundo método de Hvorslev (1951) .....	63

Figura 27 – Histograma e frequência acumulada da condutividade hidráulica das rochas metassedimentares alteradas, segundo método de Bower & Rice (1976).....	64
Figura 28 – Gráfico de correlação dos valores de condutividade hidráulica obtidos através dos métodos de Bower & Rice e Hvorslev, para as rochas metassedimentares .....	65
Figura 29 – Afloramento de gnaisses, área B3 .....	67
Figura 30 – Testemunho de gnaiss, poço TS 54, área B4 .....	68
Figura 31 – Histograma e frequência acumulada da condutividade hidráulica das rochas granitóides e gnáissicas alteradas, segundo método de Hvorslev (1951) .....	71
Figura 32 – Histograma e frequência acumulada da condutividade hidráulica das rochas granitóides e gnáissicas alteradas, segundo método de Bower & Rice (1976).....	72
Figura 33 – Gráfico de correlação dos valores de condutividade hidráulica obtidos através dos métodos de Bower & Rice e Hvorslev, para as rochas granitóides e gnáissicas .....	73
Figura 34 – Histograma e frequência acumulada da condutividade hidráulica (Hvorslev) para o conjunto de poços de monitoramento, com valor médio de profundidade de filtro saturado menor que 1000 cm.....	76
Figura 35 - Histograma e frequência acumulada da condutividade hidráulica (Hvorslev) para o conjunto de poços de monitoramento, com valor médio de profundidade de filtro saturado maior que 1000 cm .....	76

## Índice de Tabelas

Tabela1 –Valores de condutividade e permeabilidade intrínseca .....	07
Tabela 2 – Valores de carga hidráulica para obtenção de reta .....	25
Tabela 3 – Produção individual por poço tubular para diferentes unidades aquíferas na Bacia do Alto Tietê.....	49
Tabela 4 – Parâmetros hidrogeológicos e construtivos dos poços de monitoramento instalados em áreas de rochas metassedimentares alteradas.....	56
Tabela 5 – Valores de condutividade hidráulica obtidos de poços de monitoramento instalados em áreas de rochas metassedimentares alteradas .....	60
Tabela 6 – Parâmetros hidrogeológicos e construtivos dos poços de monitoramento instalados em áreas de rochas granitóides e gnáissicas alteradas.....	69
Tabela 7 – Valores de condutividade hidráulica obtidos de poços de monitoramento instalados em áreas de rochas granitóides e gnáissicas alteradas.....	70
Tabela 8 – Tabela de coeficientes de correlação entre os parâmetros hidrogeológicos e construtivos dos poços de monitoramento .....	74

## Resumo

A Região Metropolitana de São Paulo apresenta áreas de embasamento cristalino alterado, densamente ocupadas, que sofreram os mais diversos impactos ambientais, comprometendo os aquíferos presentes. Este trabalho teve por objetivo a caracterização da condutividade hidráulica da porção saturada de dois domínios hidrogeológicos do embasamento cristalino alterado, um relacionado às rochas metassedimentares e outro às rochas gnáissicas. A condutividade hidráulica de ambos os domínios foi determinada através da realização de testes de *slug* em 63 poços de monitoramento. Os testes foram realizados utilizando-se transdutor de pressão de alta precisão. Os dados obtidos foram armazenados e analisados, utilizando-se os métodos de Hvorslev (1951) e Bower & Rice (1976). Os valores de condutividade hidráulica de cada domínio hidrogeológico, obtidos por ambos métodos, foram comparados através de análises estatísticas. Procurou-se estabelecer a relação entre os valores de condutividade hidráulica e a profundidade do meio saturado, bem como a influência das heterogeneidades presentes nos dois domínios hidrogeológicos. Os resultados dos testes revelaram que a condutividade hidráulica média das rochas gnáissicas alteradas é de  $7,51 \times 10^{-4}$  cm/s, segundo o método de Hvorslev (1951), e  $2,34 \times 10^{-3}$  cm/s para o método de Bower & Rice (1976). Para as rochas metassedimentares alteradas foram obtidos valores médios de  $5,01 \times 10^{-5}$  cm/s e  $7,99 \times 10^{-5}$  cm/s, respectivamente.

Palavras Chaves: Região Metropolitana de São Paulo, Condutividade Hidráulica, Embasamento Cristalino Alterado, Teste de *Slug*, Métodos de Hvorslev e Bower & Rice.

## Abstract

The São Paulo Metropolitan Region (RMSP) is located on crystalline rock areas. The region is highly populated and has suffered different environmental impacts, affecting the aquifers. The objective of this work is to characterize the of the saturated portion of two different hydrogeological domains, consisting of weathered basement, one related to the metasedimentary rocks and another to gneissic rocks. The hydraulic conductivities of both domains were determined by a series of slug tests in 63 monitoring wells. The tests were executed using a high precision pressure transducer. The data from the tests were collected, stored and analyzed using new analytical tools based on Hvorslev (1951) and Bower and Rice (1976) methods. The conductivity values obtained from both methods were evaluated using statistical analysis, looking for relationships among hydraulic conductivity, depth of saturated zone, as well as heterogeneity present on both hydrogeologic domains. Hydraulic conductivity values for weathered gneiss were  $7,51 \times 10^{-4}$  cm/s and  $2,34 \times 10^{-3}$  cm/s obtained using Hvorslev (1951) and Bower and Rice (1976), respectively. For metasedimentary rocks hydraulic conductivity values were  $5,01 \times 10^{-5}$  cm/s and  $7,99 \times 10^{-5}$  cm/s, respectively.

Key words: Hydraulic Conductivity, Weathered Basement, Slug Test, Hvorslev and Bouwer & Rice Methods.

## **1 – INTRODUÇÃO**

Nas últimas décadas, o Brasil apresentou grande crescimento populacional, principalmente nos centros urbanos. Esse fato acarretou problemas que, invariavelmente, afetaram a qualidade de vida das pessoas. O maior aglomerado urbano do País, a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), com mais de 18 milhões de habitantes, é o exemplo típico de crescimento desordenado que gerou diversos impactos ambientais.

Nas áreas urbanas, a ocupação do meio físico, de maneira pouco criteriosa e muitas vezes clandestina, ocasionou toda sorte de problemas ambientais. Na RMSP, o avanço da urbanização para as regiões periféricas, iniciada em meados do século XX, ocupou principalmente a porção alterada das rochas pré-cambrianas do embasamento cristalino. Nestas áreas, os aterros clandestinos, postos de gasolina e as indústrias, principalmente as químicas, são as principais fontes de contaminação do meio geológico.

Durante décadas, acreditou-se que o solo fosse um receptor ideal para os resíduos industriais e domésticos, pois o mesmo teria a capacidade natural de atenuação dos compostos presentes. Vazamentos de produtos químicos de tanques eram tratados como prejuízo financeiro e nunca como problema ambiental.

Na Região Metropolitana de São Paulo, Hassuda (1997), reconheceu 116 áreas de disposição de resíduos sólidos, sendo que 77 sobre o embasamento cristalino em regiões periféricas das principais zonas urbanas.

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) relacionou em 2003, no Estado de São Paulo, 727 áreas que comprovadamente apresentam passivos ambientais. Destas, cerca de 481 localizam-se na RMSP ([http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas\\_contaminadas/relacao\\_areas.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/relacao_areas.asp)).

Em grande parte das áreas contaminadas, os aquíferos presentes encontram-se comprometidos quanto à qualidade da água subterrânea, demandando medidas de caracterização, remediação e controle.

Diante deste quadro desfavorável, torna-se necessário o melhor entendimento das características hidrogeológicas dos aquíferos presentes na Região Metropolitana de São Paulo, pois grande parcela da população se utiliza deste recurso hídrico para

consumo. Nas áreas periféricas das cidades, é bastante comum a perfuração de poços tipo cacimba para o abastecimento de água das populações não assistidas pelo poder público. Grande parte destes poços é escavada na porção alterada do embasamento cristalino e, devido à baixa condutividade do aquífero, apresentam vazões limitadas. É praticamente impossível estimar o número de poços tipo cacimba em operação, demandando, assim, estudos relacionados ao uso e às características hidrogeológicas deste aquífero.

Para os estudos hidrogeológicos, o parâmetro mais importante é a condutividade hidráulica, pois reflete a capacidade que um meio poroso possui para transmitir água. Este parâmetro pode variar até 17 ordens de grandeza. Todavia, obtido de forma correta, permite estimar, por exemplo, a velocidade de uma pluma de contaminação em um aquífero.

O presente trabalho retrata o uso de testes *de slug* em poços de monitoramento, para caracterização da condutividade hidráulica da porção saturada do embasamento cristalino alterado na RMSP. Estes ensaios são de rápida realização e de baixo custo.

## **2 – OBJETIVOS**

O presente trabalho objetivou caracterizar a condutividade hidráulica da porção saturada do embasamento cristalino alterado da Região Metropolitana de São Paulo, enfatizando os seguintes aspectos:

- ✓ aplicação de novas técnicas de análise aos métodos de determinação da condutividade hidráulica;
- ✓ comparação dos resultados obtidos para a condutividade hidráulica em função dos diferentes métodos utilizados;
- ✓ comparação dos resultados obtidos para a condutividade hidráulica em função dos tipos litológicos estudados.

### 3 – Revisão Bibliográfica

#### 3.1– Lei de Darcy

Henry Darcy, engenheiro hidráulico francês, foi o responsável pelo nascimento da hidrogeologia como ciência quantitativa, em 1856, com a publicação de seu trabalho referente aos experimentos realizados na cidade de Dijon, França.

Darcy investigou o fluxo de água através de filtros preenchidos de areia homogênea e saturada. A partir desses experimentos, concluiu que a vazão de escoamento (volume por unidade de tempo)  $Q$ , utilizando um sistema similar ao mostrado esquematicamente na Figura 1, é:

- ✓ proporcional à área da seção transversal ( $A$ ) do filtro;
- ✓ proporcional à diferença de carga hidráulica ( $\Delta h = h_1 - h_2$ );
- ✓ inversamente proporcional ao comprimento  $L$ .

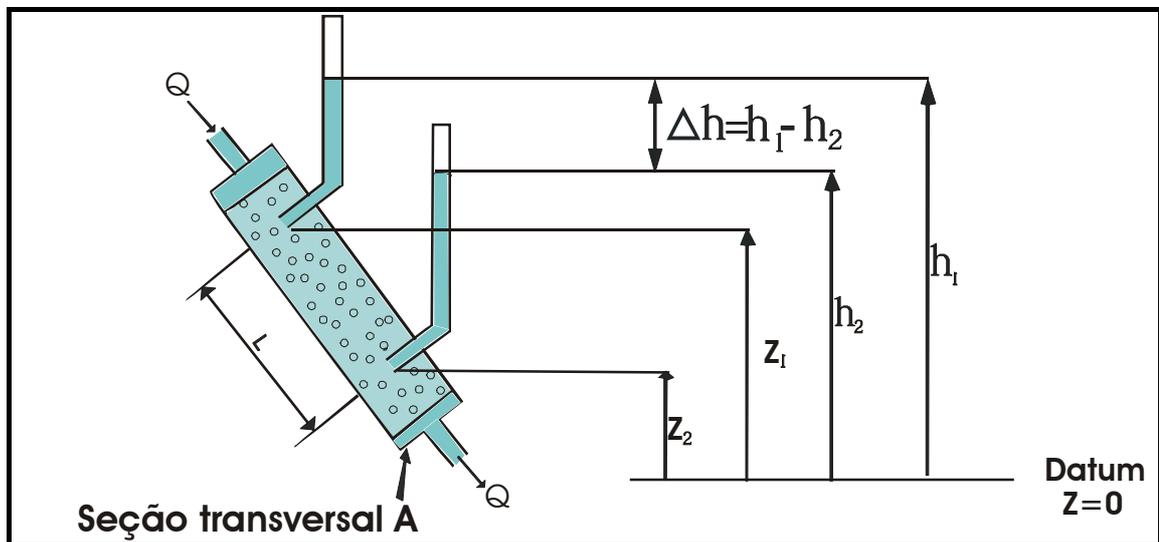


Figura 1: Experimento de Darcy (modificado de Freeze & Cherry, 1979).

Estas conclusões combinadas resultaram na Lei de Darcy:

$$Q = -KA \left( \frac{h_1 - h_2}{L} \right) \quad (\text{equação 1})$$

Na equação acima, o **K** é o coeficiente de proporcionalidade conhecido como condutividade hidráulica. As elevações **h<sub>1</sub>** e **h<sub>2</sub>** são medidas em relação a um mesmo *datum*.

A equação 1 pode ser escrita na forma diferencial, da seguinte maneira:

$$Q = -KA \frac{dh}{dL} \quad (\text{equação 2})$$

onde:

dh/dL = gradiente hidráulico (i) [L/L];

K = constante de proporcionalidade (condutividade hidráulica) [L/T];

Q = taxa volumétrica de fluxo [L<sup>3</sup>/T].

O sinal negativo é indicação do fluxo na direção de cargas decrescentes. Definindo,  $q=Q/A$  como descarga específica, velocidade aparente ou ainda velocidade de Darcy, tem-se:

$$q = -K \frac{dh}{dl} \quad (\text{equação 3})$$

A equação 2 pode ser rearranjada para mostrar que o coeficiente (condutividade hidráulica) tem a dimensão de comprimento/tempo (L/T), ou velocidade.

$$K = \frac{-Q}{A \left( \frac{dh}{dl} \right)} = \frac{- \left( \frac{L^3}{T} \right)}{\left( L^2 \right) \left( \frac{L}{L} \right)} = \left( \frac{L}{T} \right) \quad (\text{equação 4})$$

As unidades mais comumente utilizadas para condutividade hidráulica (K) são: cm/s, m/s ou m/d.

Segundo Hubbert (1956, *apud* Fetter, 2001), a condutividade hidráulica é função do meio poroso e das características do fluido que o atravessa. A permeabilidade intrínseca está relacionada somente às características do meio poroso, não importando as propriedades do fluido. A permeabilidade intrínseca é dada pela seguinte expressão:

$$k = Cd^2 \quad (\text{equação 5})$$

onde:

k = permeabilidade intrínseca;

C = constante de forma;

d = diâmetro médio das partículas.

A relação entre permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica é dada segundo a expressão:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (\text{equação 6})$$

onde:

K = condutividade hidráulica;

k = permeabilidade intrínseca;

$\rho$  e  $\mu$  são propriedades do fluido, sendo  $\rho$  a densidade e  $\mu$  a viscosidade;

g = aceleração da gravidade.

Portanto, a partir da equação 6:

$$k = \frac{K\mu}{\rho g} \quad (\text{equação 7})$$

A permeabilidade intrínseca tem dimensão em L<sup>2</sup>, e é usualmente expressa como unidade *Darcy*, sendo 1 *Darcy* equivalente a 9,87 x 10<sup>-9</sup> cm<sup>2</sup>.

### 3.2 - Valores de Condutividade Hidráulica

Na natureza, a condutividade hidráulica pode variar dezessete ordens de grandeza. Sanders (1998) compilou os valores de condutividade hidráulica para diferentes tipos litológicos, propostos por diversos pesquisadores (Tabela 1). Na Tabela 1, os valores para as rochas metamórficas e ígneas referem-se às rochas sãs e fraturadas.

Tabela 1: Valores de condutividade hidráulica e permeabilidade intrínseca (Sanders, 1998)

sedimento/rocha	Condutividade hidráulica (cm/s)	Permeabilidade intrínseca (cm <sup>2</sup> )
Argila	$10^{-9}$ a $10^{-4}$	$10^{-14}$ a $10^{-11}$
Silte	$10^{-7}$ a $10^{-3}$	$10^{-12}$ a $10^{-8}$
Areia fina	$10^{-5}$ a $10^{-3}$	$10^{-10}$ a $10^{-8}$
Areia média	$10^{-3}$ a $10^{-1}$	$10^{-12}$ a $10^{-8}$
Cascalho	$10^{-1}$ a $10^{+2}$	$10^{-6}$ a $10^{-3}$
Tilito denso, não fraturado.	$10^{-9}$ a $10^{-5}$	$10^{-14}$ a $10^{-9}$
Tilito fraturado	$10^{-7}$ a $10^{-3}$	$10^{-12}$ a $10^{-8}$
Folhelho são	$10^{-11}$ a $10^{-7}$	$10^{-16}$ a $10^{-12}$
Folhelho fraturado/alterado	$10^{-7}$ a $10^{-4}$	$10^{-12}$ a $10^{-9}$
Arenito bastante cimentado	$10^{-8}$ a $10^{-5}$	$10^{-13}$ a $10^{-10}$
Arenito pouco cimentado	$10^{-6}$ a $10^{-3}$	$10^{-11}$ a $10^{-8}$
Calcário e dolomita	$10^{-7}$ a $10^{-3}$	$10^{-12}$ a $10^{-8}$
Calcário e dolomita ( <i>Karst</i> )	$10^{-4}$ a $10^{+4}$	$10^{-12}$ a $10^{-9}$
Anidrita	$10^{-10}$ a $10^{-9}$	$10^{-15}$ a $10^{-14}$
Sal	$10^{-12}$ a $10^{-5}$	$10^{-17}$ a $10^{-9}$
Basalto são	$10^{-9}$ a $10^{-6}$	$10^{-14}$ a $10^{-11}$
Basalto fraturado/vesicular	$10^{-4}$ a $10^{+3}$	$10^{-9}$ a $10^{-2}$
Rochas ígneas e metamórficas sãs	$10^{-12}$ a $10^{-8}$	$10^{-17}$ a $10^{-13}$
Rochas ígneas e metamórficas fraturadas	$10^{-8}$ a $10^{-4}$	$10^{-13}$ a $10^{-9}$

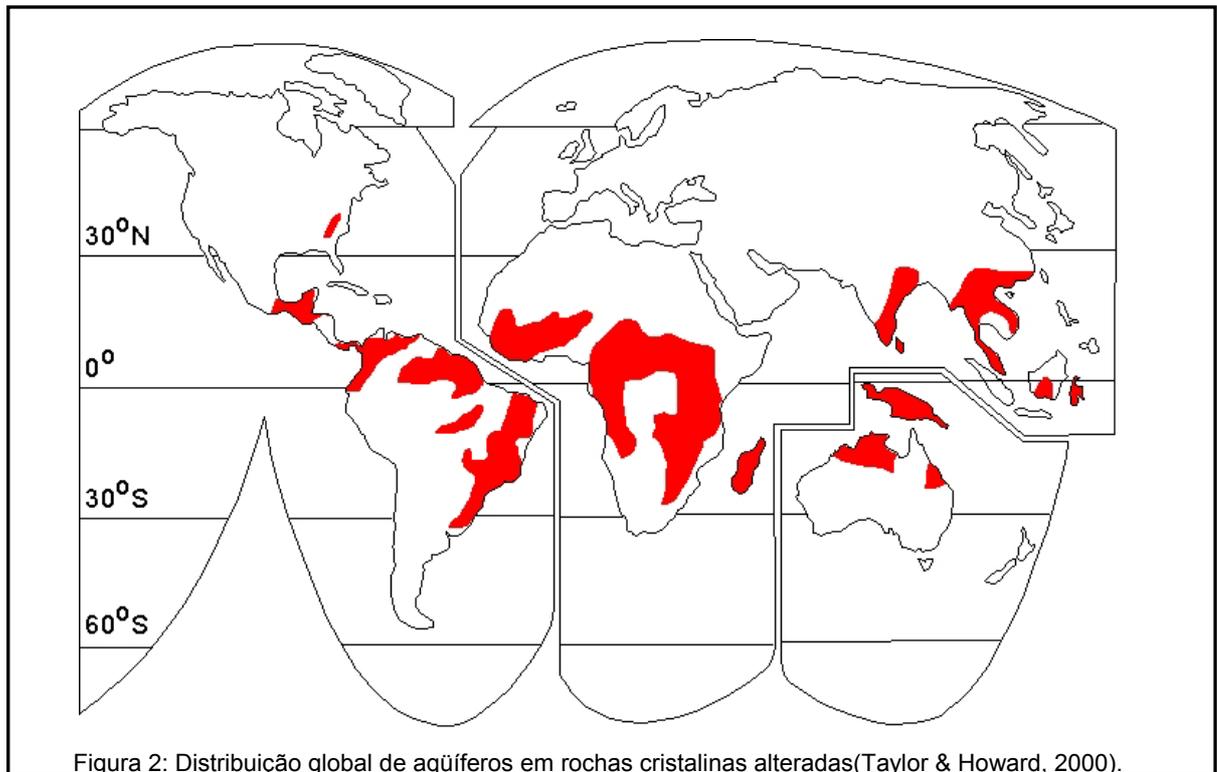
Na Tabela 1 não se observam valores de condutividade referentes à porção alterada dos tipos litológicos apresentados. Esta ausência pode estar relacionada ao fato de toda a bibliografia compilada referir-se a estudos em áreas de clima temperado, onde a porção alterada dos diversos tipos litológicos geralmente é pouco espessa.

Em regiões de clima tropical, caso da área estudada, o intemperismo, principalmente químico, leva à formação de espessos mantos de alteração nas áreas de rocha cristalina. O intemperismo é o processo de alteração dos minerais presentes nas rochas, variando em função da composição mineralógica e da presença de descontinuidades (fraturas, falhas) e estruturas (foliação) que facilitam a circulação da água no maciço rochoso.

Aqüíferos presentes em rochas cristalinas alteradas possuem espessura de dezenas de metros e estendem-se por regiões de baixa latitude das Américas, África e Ásia (Figura 2). Historicamente, nos países subdesenvolvidos, especialmente os africanos, este tipo de aqüífero é intensivamente utilizado no abastecimento das comunidades rurais e urbanas. Taylor & Howard (1996) estimaram que aproximadamente 80% da população de Uganda é abastecida através de poços rasos, escavados no manto de alteração de rochas cristalinas.

O aqüífero presente na espessa porção alterada de granitos e gnaisses de Uganda foi amplamente estudado quanto à origem e às propriedades hidrogeológicas, por Taylor & Tindimugaya (1995), Taylor & Howard (2000) e Taylor (2001). As propriedades hidrogeológicas, obtidas através de testes de bombeamento, análises granulométricas, testes de *slug* e uso de traçadores conservativos, indicaram que o aqüífero presente é de natureza livre e possui valores de condutividade hidráulica variando entre  $3,5 \times 10^{-4}$  a  $3,5 \times 10^{-3}$  cm/s e média de  $1,5 \times 10^{-3}$  cm/s.

No Brasil, Cavalcante (1990), através da análise de testes de bombeamento em poços tubulares, determinou valores de condutividade hidráulica para a porção saturada do manto de intemperismo presente nos gnaisses e xistos de Atibaia (SP). Concluiu que a porção mais alterada, onde as estruturas da rocha matriz são pouco preservadas, apresentou valores de condutividade hidráulica variando de  $1 \times 10^{-4}$  a  $1 \times 10^{-5}$  cm/s e a porção parcialmente alterada, que manteve as estruturas reliquias preservadas, apresentou valores de condutividade hidráulica de  $1 \times 10^{-3}$  a  $1 \times 10^{-2}$  cm/s. Salles (1999) avaliou uma área contaminada por compostos orgânicos em São Paulo (SP) e determinou, através de testes de *slug* em sete poços de monitoramento, a condutividade hidráulica do nível superior da porção saturada de xistos alterados. A condutividade média obtida foi de  $4,33 \times 10^{-5}$  cm/s e os valores máximos e mínimos foram respectivamente  $1,23 \times 10^{-4}$  e  $4,57 \times 10^{-6}$  cm/s.



### 3.3 – Ensaios de Condutividade Hidráulica

O conhecimento dos valores e da variação espacial da condutividade hidráulica é de suma importância para o entendimento de um aquífero e para o planejamento de ações interventivas sobre este. Por exemplo, na avaliação hidrogeológica de uma área contaminada, a determinação precisa dos valores de condutividade hidráulica é necessária para estimar a velocidade de fluxo da água subterrânea, no cálculo das taxas de transporte dos contaminantes, na análise de risco da área impactada e no esboço dos métodos de remediação.

Os valores de condutividade hidráulica de sedimentos, rochas e solos podem ser determinados por diferentes métodos. Todos apresentam vantagens e inconveniências e se baseiam em hipóteses simplificadas. Os métodos podem ser efetuados em laboratório ou *in situ*.

Os métodos de laboratório para determinação da condutividade hidráulica são realizados em amostras pontuais, obtidas em diferentes profundidades, muitas vezes dentro de um mesmo perfil, de forma que, na maioria das vezes, não refletem as

heterogeneidades intrínsecas do meio estudado. Entretanto, a principal vantagem é o maior controle sobre as características dos ensaios. Para o estudo de aquíferos, os métodos incluem a análise granulométrica e o permeâmetro de carga constante.

Os métodos de Hazen (1911; in Fetter, 2001) e Shepherd (1989) utilizam a análise granulométrica na determinação da condutividade hidráulica e são aplicados somente em sedimentos arenosos.

O permeâmetro de carga constante, descrito em Freeze & Cherry (1979), utiliza amostras indeformadas na obtenção da condutividade hidráulica. Dada a dificuldade de se obter amostras indeformadas a partir do meio saturado, muitos dos ensaios são realizados em amostras extraídas da zona não saturada e medem a condutividade vertical.

Os métodos *in situ* possibilitam a obtenção dos valores de condutividade hidráulica do meio geológico no seu estado natural, sendo influenciados pelas heterogeneidades presentes no local investigado. Para a investigação de meios saturados, os testes de bombeamento e de *slug* são freqüentemente utilizados. Em estudos mais detalhados, a utilização de traçadores conservativos têm sido uma alternativa na determinação dos valores de condutividade hidráulica.

Os méritos e as falhas de cada método podem ser discutidos, porém não cabe concluir a superioridade de um método sobre outro. A escolha de um método é usualmente determinada em função da finalidade do estudo, do meio hidrogeológico avaliado, bem como da disponibilidade financeira e de tempo do investigador. Pode-se obter dados confiáveis da condutividade hidráulica mediante a escolha do método apropriado para o caso, junto com planejamento adequado dos ensaios, uso de instrumentação acurada e respeitando-se os fundamentos do método.

Para o estudo de aquíferos rasos, de natureza livre e de baixa permeabilidade, como os presentes em perfis de alteração de rochas cristalinas, diversos autores como Butler (1997), Butler & Healey (1998) e Yang & Gates (1997) propõem a utilização de testes de *slug* para a caracterização da condutividade hidráulica. Para estes autores, testes de bombeamento são demorados, custosos, necessitam de poços de observação e em áreas contaminadas toda água bombeada tem de ser tratada. Cabe ressaltar que para o estudo de litologias de baixíssima condutividade hidráulica, a realização de testes de bombeamento é praticamente impossível.

### 3.3.1 - Testes de *Slug*

O ensaio de campo conhecido como teste de *slug* vem sendo utilizado, nos últimos anos, principalmente na caracterização de áreas onde se suspeita que a água subterrânea encontra-se contaminada. Butler (1997) estimou em dezenas de milhares o número de ensaios realizados anualmente nos Estados Unidos. No Brasil, desde o pioneiro trabalho de Oliveira (1992), onde a metodologia do ensaio foi descrita, este tipo de ensaio vem sendo utilizado nas caracterizações de diferentes domínios hidrogeológicos por pesquisadores e profissionais de empresas de consultoria ambiental.

Na prática, o teste de *slug* consiste em introduzir ou retirar um cilindro sólido (*slug*) dentro de um poço de monitoramento de pequeno diâmetro, de forma que o nível d'água (NA) no poço seja elevado ou rebaixado quase instantaneamente. Este volume deslocado equivale à adição ou à retirada de água do aquífero e é igual ao volume do *slug*. Medindo-se a subida/descida do NA com o tempo, obtém-se valores que, juntamente com as características geométricas do poço e utilizando-se o método de análise adequado, fornecem o valor de condutividade hidráulica nas imediações do poço de monitoramento ensaiado. Em determinadas condições, o teste de *slug* pode ser utilizado na obtenção do coeficiente de armazenamento de aquíferos (Cooper *et al.* 1967).

Cada vez mais utilizados na caracterização da condutividade hidráulica de aquíferos, os testes de *slug* apresentam as seguintes vantagens:

- ✓ são de fácil execução;
- ✓ são de baixo custo quanto ao uso de mão de obra e valor de equipamentos;
- ✓ podem ser realizados por uma única pessoa.
- ✓ permitem a determinação da variação espacial da condutividade hidráulica, em uma mesma área, através da realização de vários testes em diferentes poços de monitoramento;
- ✓ possibilitam obter a variação vertical e horizontal dos valores de condutividade hidráulica;
- ✓ permitem a determinação da condutividade hidráulica de uma porção discreta do meio saturado como, por exemplo, uma camada de areia pouco espessa inserida em um pacote argiloso.

Quanto às desvantagens do uso dos testes de *slug*, vários autores como Palmer & Paul (1987), Hyder & Butler (1995), Butler (1996) e Yang & Gates (1997) constataram a extrema dependência dos ensaios em relação ao grau de desenvolvimento dos poços de monitoramento. Durante a perfuração dos poços, a rotação e a manobra de retirada do trado promovem a aderência de partículas de silte e argila junto à parede do furo, diminuindo a condutividade hidráulica da formação. Estes autores denominaram este fenômeno de “*skin effect*”. Este fenômeno pode também ser produzido através de reações bioquímicas que se iniciam logo após a instalação do poço de monitoramento, acarretando a obstrução dos filtros e a diminuição da condutividade do pré-filtro (Butler, 1997).

Durante os testes de *slug* em formações de baixa condutividade hidráulica, a variação do nível d’água (NA) pode ser medida manualmente, utilizando-se medidores de nível eletro-eletrônicos dotados de fita métrica, desde que a coluna de pré-filtro permaneça saturada após a retirada do sólido (*slug*).

Poços de monitoramento instalados em formações de alta condutividade hidráulica podem recuperar o nível d’água (NA) original em alguns segundos. Para tais casos, é necessária a utilização de transdutores de pressão que tenham a capacidade de medir a variação do NA, no mínimo a cada segundo. O transdutor transforma a coluna d’água (pressão) em sinal elétrico que, por sua vez, é transformado em sinal digital por um aparelho receptor. O sinal digital pode ser armazenado em *data logger* externo ou computador. Alguns modelos de transdutores possuem memória embutida do tipo *flash*, que permite o armazenamento dos dados no próprio aparelho.

Existem no mercado fabricantes de transdutores que produzem modelos de alta precisão para diversas faixas de operação de espessura da coluna d’água. Os transdutores podem ser instalados em poços de monitoramento com diâmetro a partir de uma polegada (2,54 cm) e são resistentes à água contaminada. Alguns modelos corrigem automaticamente a variação barométrica, fornecendo valores de variação de NA.

Para os testes de *slug*, o transdutor deve ser instalado no mínimo 0,5 m abaixo da posição de inserção do sólido, durante os ensaios, para evitar dano ao mesmo. O transdutor não deve ser posicionado no fundo dos poços de monitoramento, pois os

sedimentos depositados afetam a precisão das medidas devido ao entupimento do diafragma.

A maneira mais usual de se iniciar um teste de *slug* é inserir/retirar rapidamente um cilindro sólido (*slug*). O sólido pode ser um tarugo maciço de polietileno ou *nylon* com uma corda amarrada em uma das suas extremidades. O volume do sólido deve ser conhecido para permitir avaliar o deslocamento máximo possível ( $H_0$ ) do NA durante os testes. O comprimento ideal do *slug* é em torno de 1 metro, o que permite a inserção/retirada em um único lance.

Segundo Butler (1997), testes de *slug* do tipo pneumático vêm sendo cada vez mais utilizados na análise da condutividade hidráulica de poços, que tenham coluna de filtro saturada, através da pressurização da coluna de ar presente no interior do poço selado. A pressurização do ar promove o rebaixamento do nível d'água no interior do poço. Uma vez estabilizada a coluna d'água, rapidamente o ar comprimido é liberado, promovendo a subida do nível d'água, medida ao longo tempo através de transdutor de pressão.

A Figura 3 demonstra o teste de *slug*.

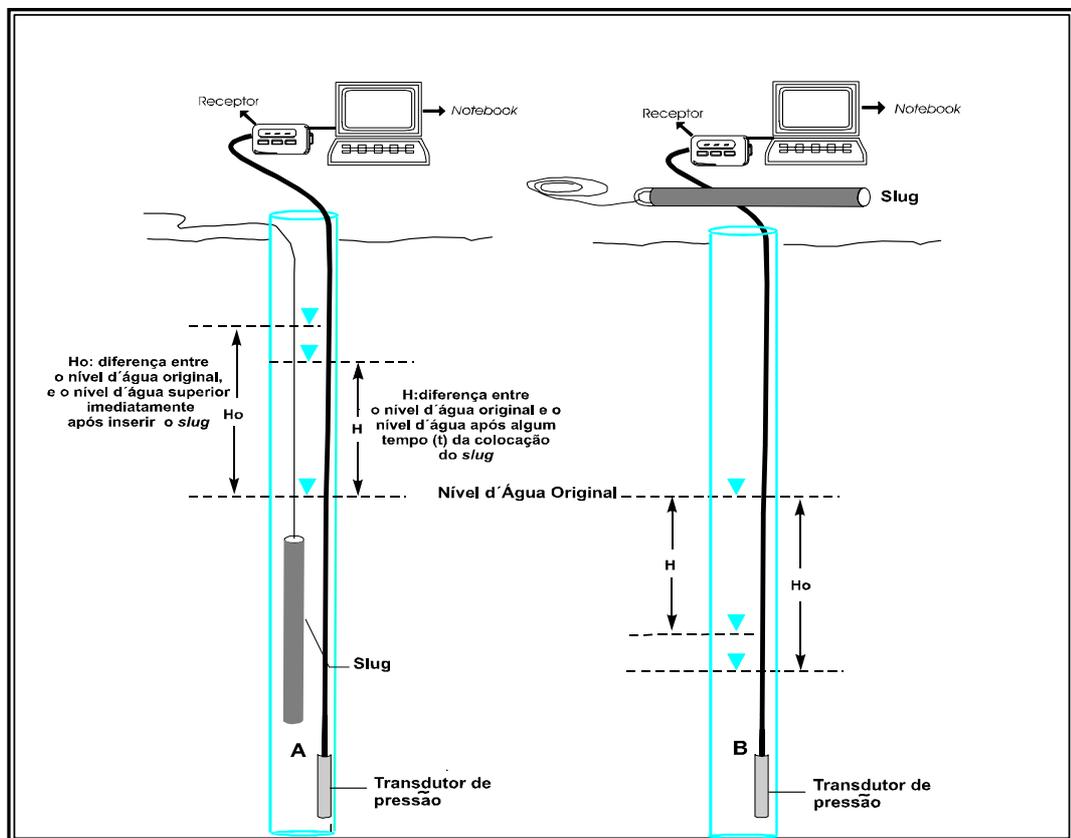


Figura 3: Desenho esquemático do teste de *slug* com a inserção (A) e retirada (B) de cilindro sólido

## Métodos de Análise

Os dados dos testes de *slug* são analisados usando soluções analíticas relacionadas às equações que regem o fluxo da água subterrânea. As soluções analíticas assumem que o aquífero é homogêneo, isotrópico, infinito e sua espessura se mantém constante durante os ensaios. Na prática, parte destas premissas são observadas, pois o raio de influência dos ensaios é bastante limitado em relação à extensão dos aquíferos.

Durante os testes de *slug*, em aquíferos de baixa a média condutividade hidráulica, a variação do nível d'água nos poços de monitoramento pode se dar de maneira suave, aproximadamente exponencial, denominada por McGuire & Zlotnik (1995) de *overdamped*. Van der Kamp (1976) denominou de *underdamped* a resposta oscilatória do nível d'água durante ensaios em aquíferos de alta condutividade hidráulica ou poços com longa coluna d'água.

Para análise de testes de *slug*, em aquíferos que apresentam resposta não oscilatória (*overdamped*), são utilizados os métodos de Hvorslev (1951) e Bouwer & Rice (1976,1989). Ambos métodos são baseados na equação de Thiem (1906) em que o regime de fluxo é estacionário, o aquífero e a água são incompressíveis, e a variação do armazenamento é nula. Qualquer mudança na carga hidráulica é dissipada através do aquífero.

### Método de Hvorslev (1951)

O método de Hvorslev para análise dos testes de *slug*, em aquíferos confinados e poços totalmente penetrantes, é baseado no modelo matemático para fluxo radial definido como:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S_s}{K_r} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{equação 7})$$

Assumindo o armazenamento  $S_s = 0$ , tem-se:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = 0 \quad (\text{equação 8})$$

$$H(0) = H_0 \quad (\text{equação 9})$$

$$h(R_e, t) = 0, t > 0 \quad (\text{equação 10})$$

$$h(r_w, t) = H(t), t > 0 \quad (\text{equação 11})$$

$$2\pi r_w K_r B \frac{\partial h(r_w, t)}{\partial r} = \pi r_c^2 \frac{dH(t)}{dt}, t > 0 \quad (\text{equação 12})$$

onde:

$h$  = variação do nível d'água no aquífero [L];

$K_r$  = componente radial da condutividade hidráulica [L/T];

$S_s$  = armazenamento específico [1/L];

$R_e$  = distancia radial efetiva onde a carga é dissipada;

$B$  = espessura do aquífero [L];

$H$  = variação do nível d'água no poço [L];

$H_0$  = variação inicial do nível d'água no poço [L];

$r_w$  = raio efetivo do filtro [L];

$r_c$  = raio efetivo do poço [L];

$t$  = tempo [t];

$r$  = direção radial [L].

Segundo Butler (1997), a solução analítica do modelo matemático, definido pelas equações 8 a 12, pode ser escrita como:

$$\ln\left(\frac{H(t)}{H_0}\right) = -\frac{2K_r B t}{r_c^2 \ln(R_e / r_w)} \quad (\text{equação 13})$$

Quando os valores de carga hidráulica normalizada ( $H(t)/H_0$ ) são plotados *versus* tempo ( $t$ ), em gráfico *monolog*, os pontos apresentam a forma de uma reta. Por regressão linear, obtém-se a reta média dos pontos. 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 teste  $H/H_0 = 1$  ( $\log 1 = 0$ ) e  $t=0$ , a inclinação da reta, é dada por  $\log 0,368/T_0$  que, escrita em termos de logaritmo natural, torna-se  $-1/T_0$ .

Desta forma, para  $H/H_0 = 0,368$  (em termos práticos 0,37), tem-se a equação 13 escrita da seguinte maneira:

$$K_r = \frac{r_c^2 \ln(R_e / r_w)}{2BT_0} \quad (\text{equação 14})$$

Segundo Butler (1997), para poços totalmente penetrantes, instalados em aquíferos confinados, o valor de  $R_e$  é igual a 200 vezes o valor do raio do poço  $r_w$ .

Hvorslev (1951) apresentou várias soluções analíticas para diferentes tipos de piezômetros e condições de aquífero. Segundo Fetter (2001), na 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 ( $L_e/R > 8$ ). Tal condição é normalmente encontrada nos poços de monitoramento, onde o comprimento do filtro é consideravelmente maior que o raio do poço.

Para  $L_e/R > 8$ , tem se:

$$K_r = \frac{r_c^2 \ln(L_e / R)}{2L_e T_0} \quad (\text{equação 15})$$

onde:

$L_e$  = comprimento do filtro;

$R$  = raio efetivo do poço.

Na prática, nos poços de monitoramento, o fator **R** refere-se ao raio da perfuração  $r_w$ , onde o espaço anular entre o tubo de revestimento e o furo é preenchido por pré-filtro. Para litologias de baixa permeabilidade, alguns autores (Palmer & Paul, 1987; Fetter, 2001) consideram o comprimento do filtro  $L_e$  o comprimento total do pré-filtro. Segundo Butler (1997), para poços instalados nestas litologias, a porção do pré-filtro acima do filtro é de difícil desenvolvimento por bombeamento ou pistoneamento; portanto, deve-se considerar  $L_e$  somente o comprimento do filtro saturado.

A Figura 4 mostra os parâmetros utilizados na análise segundo Hvorslev.

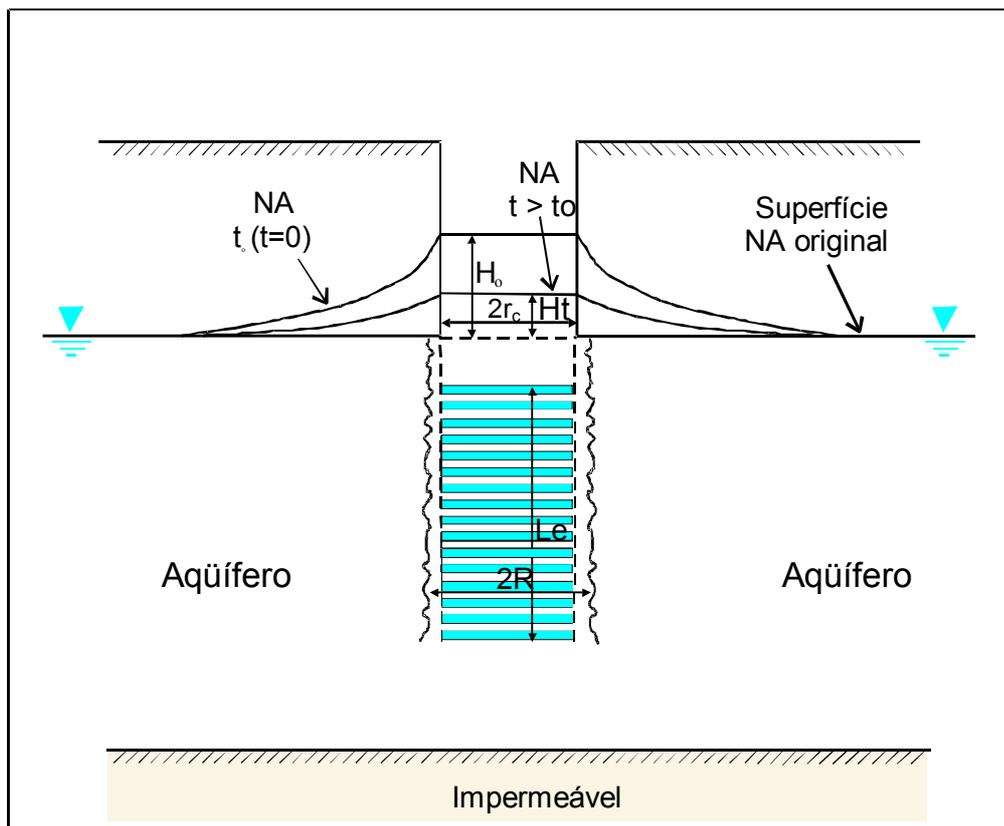


Figura 4: Ilustração esquemática do teste de *slug* (inserção) com os parâmetros geométricos utilizados na análise da condutividade hidráulica pelo método de Hvorslev (1951).

### Método de Bouwer & Rice

O método de análise de testes de *slug*, elaborado por Bouwer & Rice (1976), é utilizado no estudo de aquíferos rasos livres onde os poços de monitoramento ou piezômetros penetram parcialmente (figura 5) ou totalmente a porção saturada. Segundo Bouwer & Rice (1989), embora originalmente essa metodologia tenha sido desenvolvida para aquíferos livres, ela pode ser adotada no estudo de aquíferos confinados, desde que a porção superior do filtro do poço esteja abaixo da base da camada confinante.

Segundo Butler (1997), a solução analítica do método é dada pela equação:

$$\ln\left(\frac{H(t)}{H_0}\right) = -\frac{2K_r L_e t}{r_c^2 \ln(R_e / r_w)} \quad (\text{equação 16})$$

onde:

$K_r$  = componente radial da condutividade hidráulica [L/T];

$L_e$  = comprimento do filtro [L];

$H$  = variação do nível d'água no poço [L];

$H_0$  = variação inicial do nível d'água no poço [L];

$r_w$  = raio efetivo do filtro [L];

$r_c$  = raio efetivo do tubo [L];

$t$  = tempo [t];

$R_e$  = distancia radial efetiva onde a carga é dissipada.

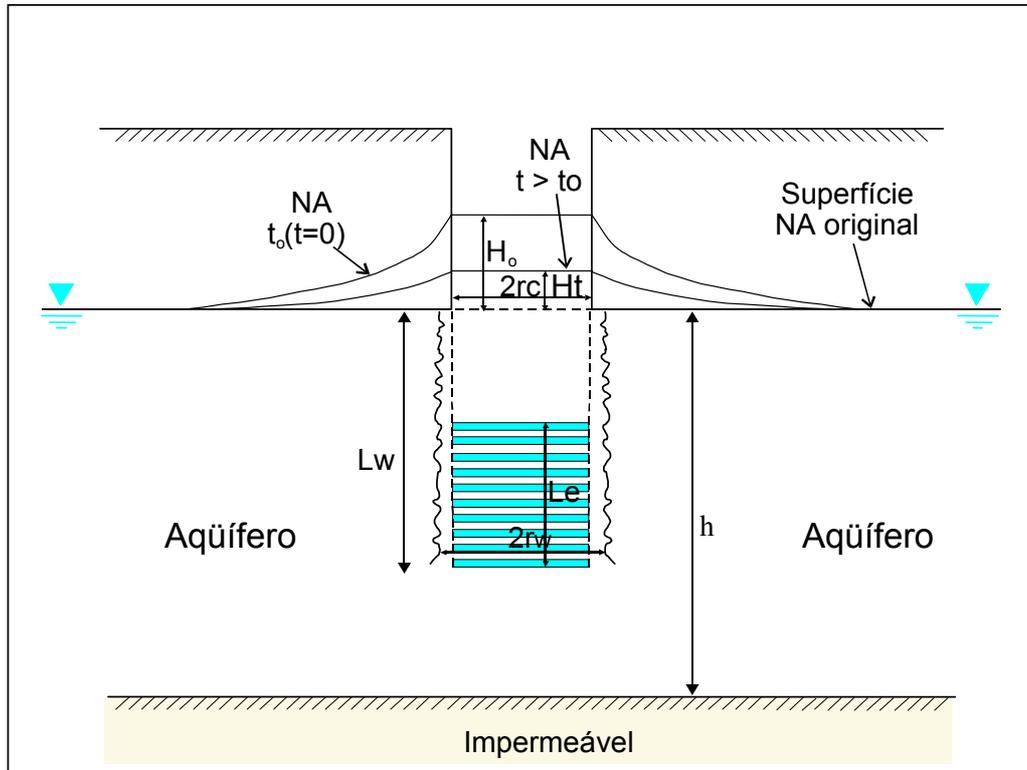


Figura 5: Ilustração esquemática do teste de *slug* (inserção) com os parâmetros geométricos utilizados na análise da condutividade hidráulica pelo método de Bouwer & Rice (1976), para poços parcialmente penetrantes.

Semelhante ao método de Hvorslev (1951), a solução do método de Bouwer & Rice (1976) envolve o cálculo da inclinação da reta formada pela plotagem, em escala logarítmica, dos valores de  $H/H_0$  versus tempo ( $t$ ). A escolha da reta pode ser de forma visual ou através de rotinas automatizadas de regressão.

Se o tempo de resposta básico ( $T_0$ ) for usado no cálculo da inclinação, tem-se:

$$K_r = \frac{r_c^2 \ln(R_e / r_w)}{2L_e T_0} \quad (\text{equação 17})$$

Comparando-se a equação acima com a solução de Hvorslev (equação 15), nota-se que somente parte do numerador é diferente. A semelhança entre as

equações deve-se ao fato de ambas soluções assumirem como estacionário o fluxo induzido pelo *slug*.

A distância radial efetiva onde a carga é dissipada,  $R_e$ , é um parâmetro empírico, pois não é possível medir esse valor em um poço. Bouwer & Rice (1976), através de simulações eletro-análogas de um modelo matemático, obtiveram equações que permitem estimar o valor adimensional da expressão  $\ln(R_e/r_w)$ , presente na equação 17.

Se a distância do nível d'água (NA) à base do filtro ( $L_w$ ) é menor que a espessura saturada do aquífero ( $h$ ),

$$\ln \frac{R_e}{r_w} = \left[ \frac{1.1}{\ln(L_w / r_w)} + \frac{A + B \ln[(h - L_w) / r_w]}{L_e / r_w} \right]^{-1} \quad (\text{equação 18})$$

Para poços totalmente penetrantes onde  $L_w$  é igual a  $h$ ,

$$\ln \frac{R_e}{r_w} = \left[ \frac{1.1}{\ln(L_w / r_w)} + \frac{C}{L_e / r_w} \right]^{-1} \quad (\text{equação 19})$$

Os valores A, B e C são valores adimensionais, empíricos, obtidos através da Figura 6.

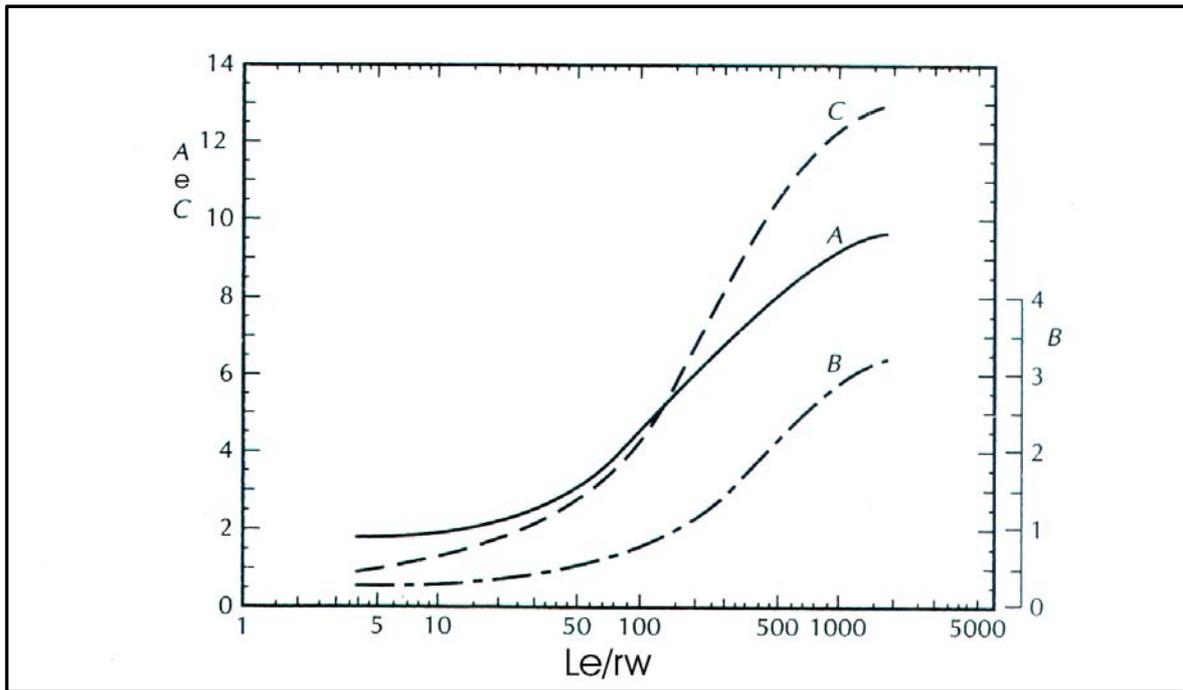


Figura 6: Valores adimensionais A, B e C, plotados em função de  $Le/r_w$  (Bouwer & Rice, 1976).

Segundo Butler (1997), valores adimensionais A, B e C também podem ser obtidos através dos seguintes polinômios:

$$A = 1,4720 + 3,537 \times 10^{-2} \left(\frac{Le}{rw}\right) - 8,148 \times 10^{-5} \left(\frac{Le}{rw}\right)^2 + 1,028 \times 10^{-7} \left(\frac{Le}{rw}\right)^3 - 6,484 \times 10^{-11} \left(\frac{Le}{rw}\right)^4 + 1,573 \times 10^{-14} \left(\frac{Le}{rw}\right)^5 \quad \text{(equação 20)}$$

$$B = 0,2372 + 5,151 \times 10^{-3} \left(\frac{Le}{rw}\right) - 2,682 \times 10^{-6} \left(\frac{Le}{rw}\right)^2 - 3,491 \times 10^{-10} \left(\frac{Le}{rw}\right)^3 + 4,738 \times 10^{-13} \left(\frac{Le}{rw}\right)^4 \quad \text{(equação 21)}$$

$$C = 0,7920 + 3,993 \times 10^{-2} \left(\frac{Le}{rw}\right) - 5,743 \times 10^{-5} \left(\frac{Le}{rw}\right)^2 + 3,858 \times 10^{-8} \left(\frac{Le}{rw}\right)^3 - 9,659 \times 10^{-12} \left(\frac{Le}{rw}\right)^4 \quad \text{(equação 22)}$$

Para poços de monitoramento onde a coluna de filtros é parcialmente submersa, possibilitando a drenança do pré-filtro durante os testes de *slug*, Bouwer (1989) recomenda a seguinte equação para correção do raio do revestimento:

$$r'_c = \left[ (1 - n)r_c^2 + nr_w^2 \right]^{1/2} \quad (\text{equação 23})$$

onde:

$r'_c$  = raio do revestimento já corrigido [L];

$r_c$  = raio do revestimento original [L];

$n$  = porosidade do pré-filtro [adimensional];

$r_w$  = raio do poço [L]

Para Bouwer (1989), no início do teste de *slug*, em situações onde ocorre a drenança do pré-filtro, a água move-se rapidamente para o poço, gerando no gráfico uma reta inicial bastante inclinada (Figura 7). Após a equalização do nível d'água, presente no pré-filtro, com o nível d'água do poço, o fluxo torna-se lento gerando uma segunda reta, menos inclinada, que representa o fluxo do aquífero não perturbado para o poço. Para análise da condutividade hidráulica, somente a segunda reta deve ser utilizada. Este fenômeno, Bouwer (1989) denominou-o de *double straight line effect*.

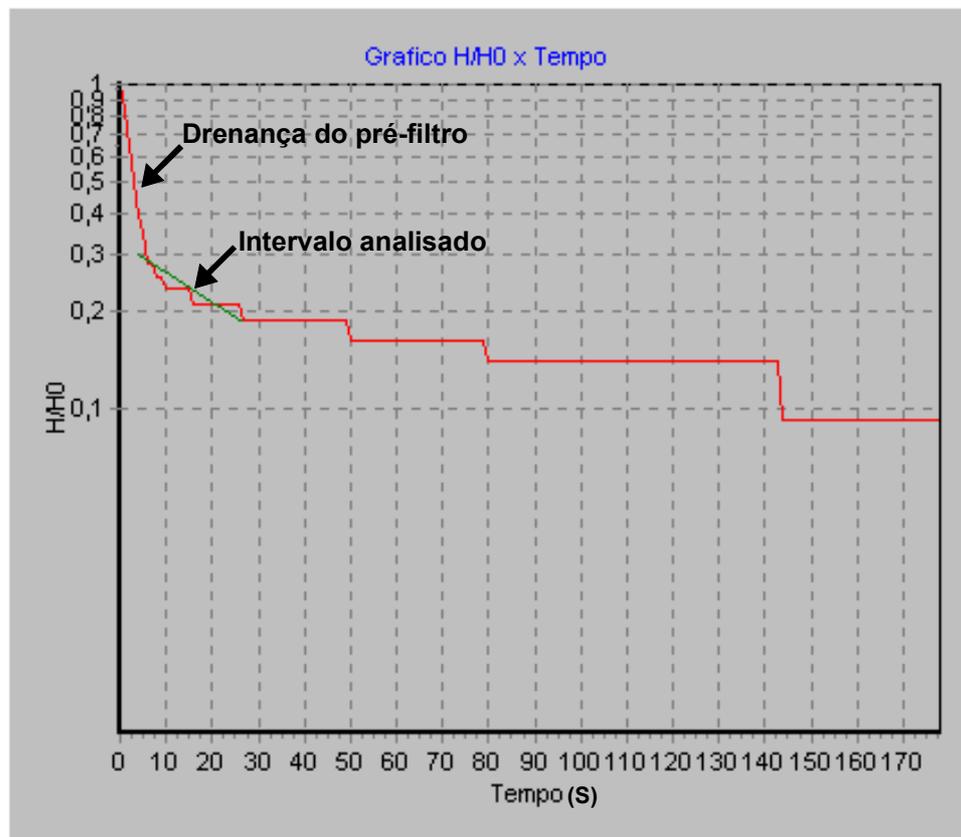


Figura 7: Valores de carga hidráulica normalizada ( $H/H_0$ ) versus tempo (t) de um teste de *slug* realizado em poço de monitoramento instalado em Taboão da Serra (SP). O nível d'água se encontra posicionado no interior da coluna de filtros, ocasionando a drenagem do pré-filtro durante o ensaio.

Para poços de monitoramento onde a coluna de filtros permanece totalmente saturada durante os testes de *slug*, o fluxo d'água é controlado somente pelo aquífero, não ocorrendo drenagem do pré-filtro (Figura 8).

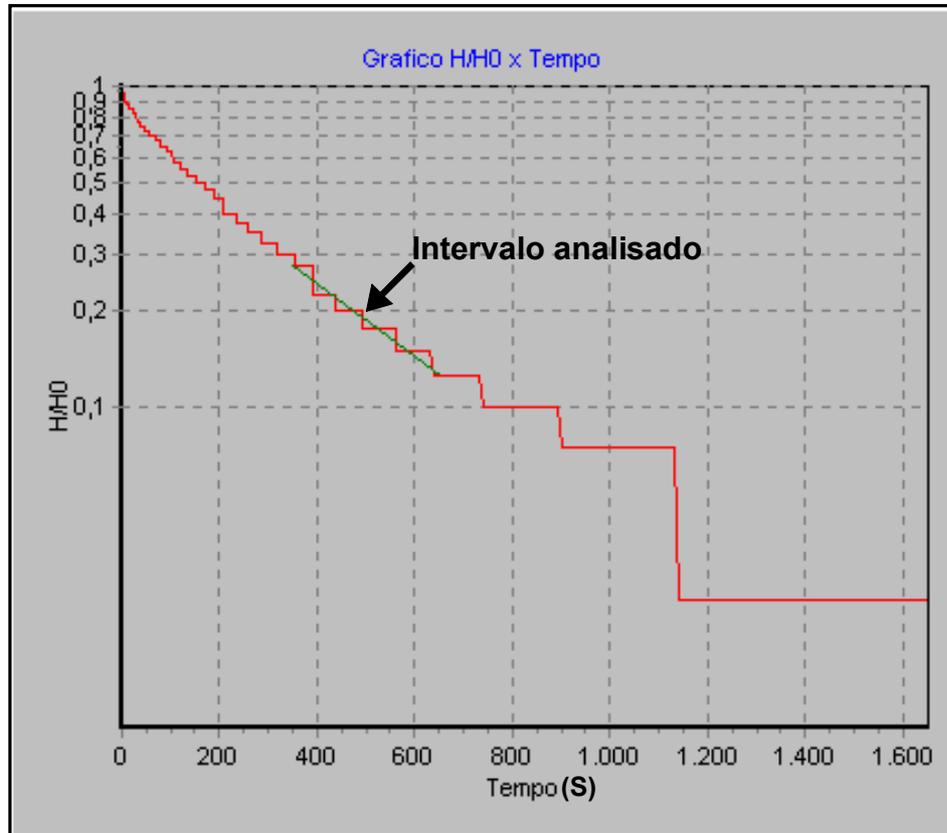


Figura 8: Valores de carga hidráulica normalizada ( $H/H_0$ ) versus tempo ( $t$ ) de um teste *slug* realizado em poço de monitoramento instalado em Mauá (SP), apresentando coluna de filtros totalmente saturada durante o ensaio.

O método de Bouwer & Rice (1976) foi desenvolvido para análise do teste de *slug*, relativo à retirada do tarugo (*slug*), que faz com que a água flua do aquífero para o poço. Os dados relativos à inserção do tarugo (*slug*) são válidos somente se a porção do filtro encontrar-se totalmente saturada, pois, caso não se encontre, a água fluirá do poço para zona vadosa do aquífero, resultando em valores superestimados de condutividade hidráulica.

## Intervalos de análise

Butler (1996), analisando o efeito da drenança do pré-filtro nos poços e a influência do armazenamento dos aquíferos na análise dos testes de *slug*, propôs intervalos de carga hidráulica normalizada ( $H/H_0$ ), para obtenção do segmento de reta a ser utilizado na análise dos dados (Tabela 2), segundo os métodos de Hvorslev (1951) e Bouwer & Rice (1976). Os intervalos de análise estão representados nas Figuras 8 e 7.

Yang & Gates (1997), analisando a condutividade hidráulica de materiais de baixa permeabilidade, através de testes de *slug*, notaram o efeito do desenvolvimento inadequado do envoltório do poço (efeito *skin*). Os autores mostraram, através de simulações numéricas e testes de campo, que o efeito *skin* é minimizado durante a análise do testes de slug, usando-se os valores finais de carga hidráulica normalizada ( $H/H_0$ ) versus tempo ( $t$ ) plotados em gráfico.

Tabela 2: Valores de carga hidráulica normalizada para obtenção da reta (Butler, 1996).

<b>Método utilizado</b>	<b>Intervalo de carga hidráulica normalizada recomendado para obtenção da reta</b>
<b>Hvorslev (1951)</b>	<b>0,15 a 0,25</b>
<b>Bouwer &amp; Rice (1976)</b>	<b>0,20 a 0,30</b>

## **4 – METODOLOGIA**

A metodologia deste trabalho compreendeu as fases de revisão bibliográfica, que inclui o levantamento dos principais trabalhos científicos e teses de hidrogeologia e geologia relacionados à Região Metropolitana de São Paulo, de levantamento de áreas para estudo, de ensaios no campo e, finalizando, a fase de tratamento e análise dos dados obtidos.

### **4.1 – Levantamento de Áreas e Trabalhos de Campo**

#### **4.1.1- Seleção das Áreas**

Nesta etapa, foram levantadas áreas passíveis de estudo junto a empresas de consultoria ambiental e de perfuração de poços de monitoramento.

Foram selecionadas áreas pertencentes a domínios geológicos relacionados ao embasamento cristalino alterado presente na Região Metropolitana de São Paulo.

Para que fosse permitida a realização dos ensaios nos poços de monitoramento das áreas selecionadas, assumiu-se o compromisso de que as mesmas não seriam identificadas quanto ao proprietário e à precisa localização.

#### **4.1.2 –Instalação de Poços de Monitoramento**

Na investigação ambiental de áreas suspeitas de contaminação, poços de monitoramento são instalados com o propósito de se obter amostras quimicamente representativas da água dos aquíferos estudados. São utilizados também para caracterização das propriedades hidrogeológicas do meio em questão.

A instalação dos poços de monitoramento utilizados para realização dos ensaios descritos nesta dissertação, seguiu a norma NBR 13.895 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

A maioria dos poços avaliados foi perfurada com equipamento do tipo *hollow stem auger*, basicamente constituído por uma sonda rotativa, montada em caminhão,

que utiliza trados ocos do tipo helicoidal com piloto interno (Figura 9). Nos últimos anos, este tipo de equipamento vem sendo cada vez mais utilizado na investigação ambiental por possuir inúmeras vantagens, tais como: rapidez na perfuração, manutenção do furo sem desmoronamentos, amostrar de forma contínua o solo e facilitar a descida da coluna de revestimento e a injeção do pré-filtro no poço. Este equipamento também permite a perfuração e a instalação de poços em locais onde o nível d'água se encontra profundo (até 50m) ou possuam litologias coesas. O diâmetro das perfurações varia de 7 ½" a 10".

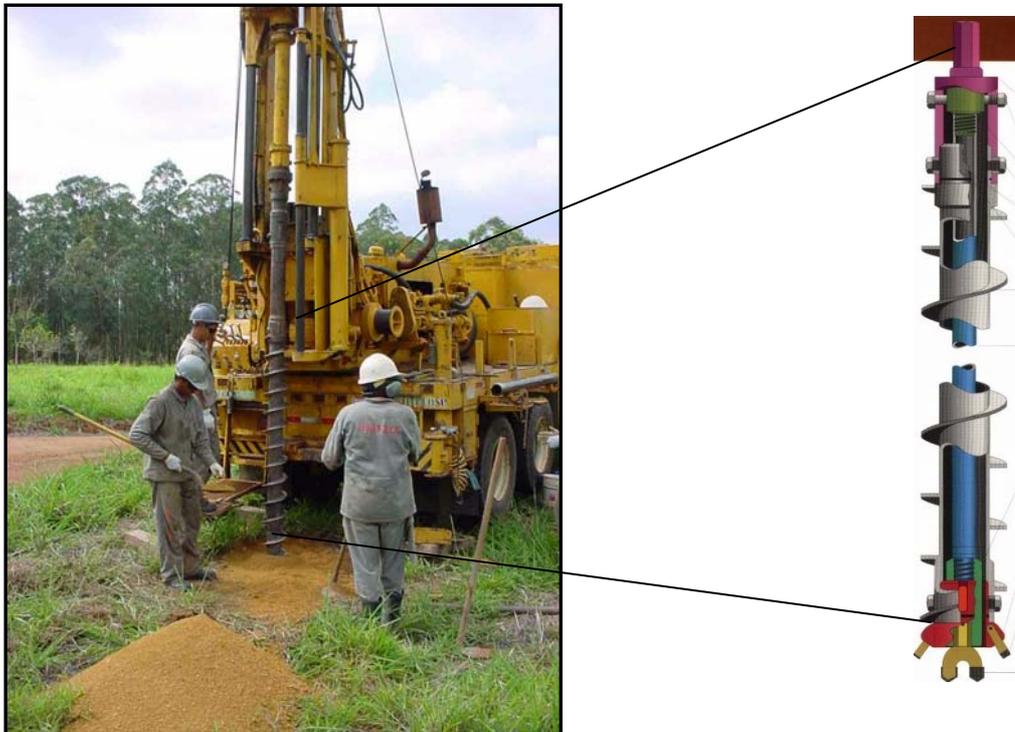


Figura 9: Caminhão com equipamento do tipo *hollow stem auger*. No detalhe, ilustração do trado oco.

Em alguns sítios investigados, para instalação de poços em áreas onde o nível d'água é raso e o solo de baixa a média resistência, optou-se pela utilização de trado manual e tripé (Figura 10). O trado é constituído por uma concha metálica dupla, acionada por hastes rosqueáveis e cruzeta. As principais vantagens deste equipamento em relação ao *hollow stem auger* são o custo mais baixo da perfuração e a facilidade de montagem em áreas de difícil acesso. O diâmetro de perfuração é normalmente de 4".



Figura 10: Trado manual e tripé

Toda descrição litológica dos furos foi realizada *in situ*, levando-se em conta os aspectos texturais, mineralógicos e de cor das amostras obtidas durante perfuração. Para obtenção de descrição geológica mais detalhada em alguns sítios, utilizou-se barrilete bipartido acoplado ao sistema de hastes interno do *hollow stem auger*.

Para revestimento dos furos foi utilizado tubo geomecânico do tipo nervurado, com diâmetro interno útil de 2". O filtro, constituído do mesmo material e com mesmo diâmetro, possui ranhuras transversais de 0,50 mm de espessura para passagem da água. Alguns poços ensaiados foram revestidos com tubos e filtros geomecânicos do tipo nervurado de 4".

O espaço anelar entre o furo da sondagem e a parede externa do tubo de revestimento foi preenchido com pré-filtro do tipo pérola, constituído por grãos de areia de granulometria variando de 1 a 2 mm. O pré-filtro foi colocado até um metro acima da ranhura superior do filtro.

Na porção anelar, acima do pré-filtro, foi colocado aproximadamente 1 metro de bentonita pelotizada e, acima desta, calda de cimento completando o furo até a

superfície. Na completção de alguns poços de monitoramento, em vez do cimento, utilizou-se solo retirado do próprio furo.

Na porção superior do poço, foi colocado tampa de pressão no tubo de revestimento com cadeado, sobreposto por uma câmara de calçada de ferro ou alumínio. Em volta da boca do poço, uma laje de cimento de 50 cm de largura funciona como proteção sanitária.

De acordo com norma vigente, os poços de monitoramento foram perfurados e instalados de maneira a possibilitar a presença de no mínimo dois metros de coluna água. Para investigação de contaminantes menos densos que a água, os filtros estendem-se acima do nível d'água, relativo ao período das chuvas. Cabe ressaltar a dificuldade de posicionamento da coluna de filtros durante a instalação de poços de monitoramento em aquíferos de baixa transmissividade, ocasionando muitas vezes o "afogamento" do poço.

Na região de Parelheiros, município de São Paulo, para investigação de uma área contaminada, foram instalados poços de monitoramento do tipo multinível, possibilitando amostragem de água e ensaios de condutividade hidráulica em diferentes níveis do aquífero. Um multinível consiste em dois a três tubos de comprimentos variáveis, munidos de filtros curtos, introduzidos em um mesmo furo, completados com pré-filtro e selo, delimitando o campo de ação de cada filtro.

Após a instalação dos poços de monitoramento, foi executado o desenvolvimento para retirada de detritos finos gerados pela perfuração. A água presente no interior e no envoltório do poço foi bombeada utilizando-se *bailers* descartáveis (amostradores de polietileno transparente) ou mangueiras descartáveis de ½ " de diâmetro, com válvula de pé. O volume de água bombeado correspondeu de três a cinco vezes o volume presente no interior e no envoltório do poço. O desenvolvimento adequado dos poços de monitoramento é importante para permitir a efetiva conexão hidráulica entre a porção filtrante dos poços e o aquífero.

A Figura 11 mostra esquematicamente o perfil construtivo dos poços de monitoramento.

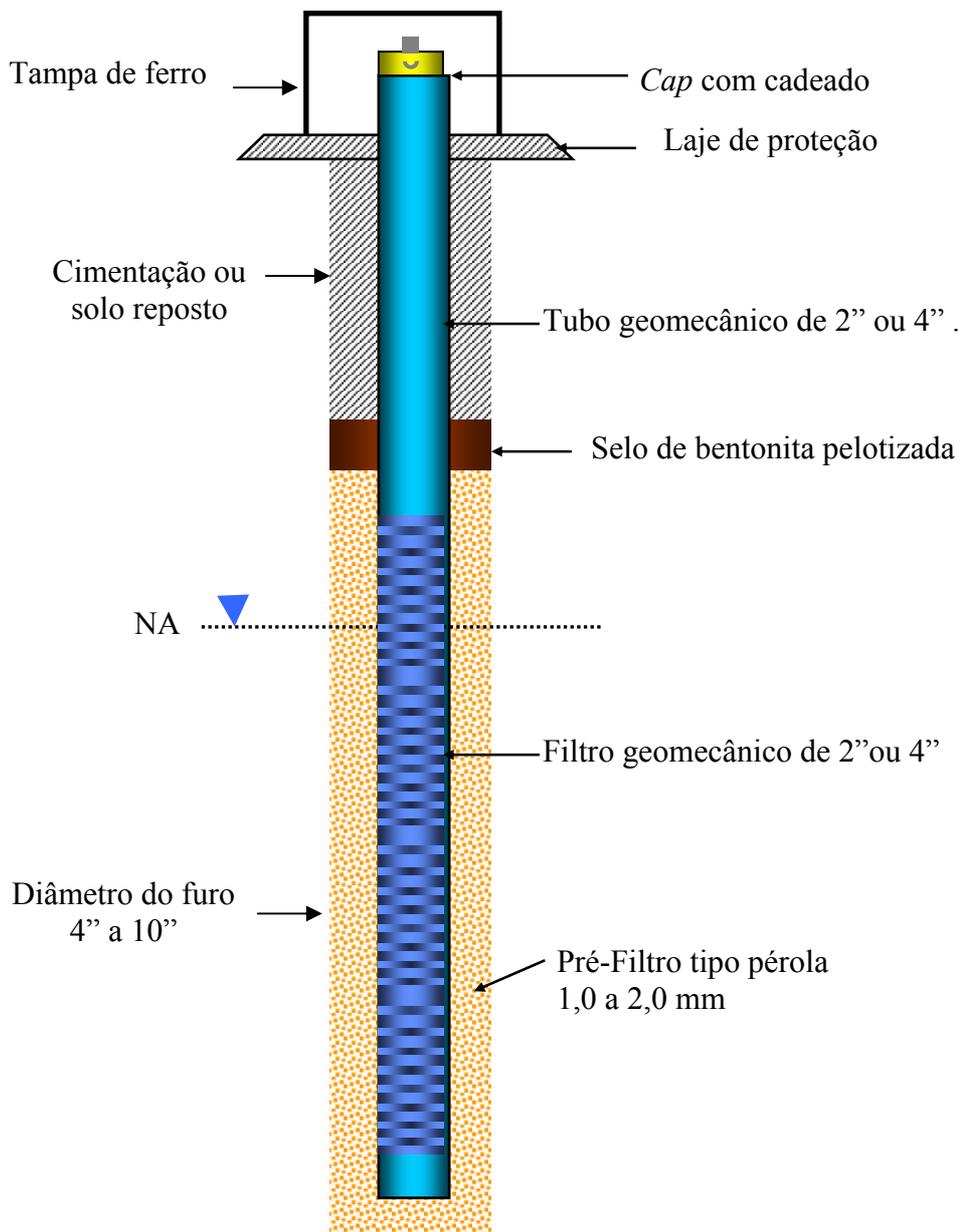


Figura 11: Perfil esquemático do poço de monitoramento.

### 4.1.3 – Determinação de Condutividade Hidráulica

Valores de condutividades hidráulicas foram determinados através de testes de *slug*, somente em poços onde a porção saturada encontrava-se exclusivamente relacionada ao perfil de alteração do embasamento cristalino. Foram excluídos poços com a porção filtrante instalada em áreas coluvionares, aluvionares e aterradas.

Para esta dissertação, foram analisados 63 poços de monitoramento, instalados em 12 diferentes áreas, distribuídas na Região Metropolitana de São Paulo. Todos os poços foram instalados de acordo com as normas descritas anteriormente.

Os ensaios foram realizados somente após o desenvolvimento, purga e coleta de amostras de água dos poços de monitoramento, evitando-se assim problemas de contaminação cruzada.

Devido ao fato dos poços de monitoramento selecionados pertencerem a áreas potencialmente contaminadas, previamente aos ensaios foram tomadas todas medidas de segurança, principalmente quanto ao uso de E.P.I. (equipamento de proteção individual).

O procedimento dos ensaios de campo consistiu nos seguintes procedimentos:

1. abrir a tampa do poço de monitoramento e aguardar o equilíbrio do nível d'água com a pressão atmosférica;
2. medir o nível estático e a profundidade do poço;
3. instalar o transdutor de pressão na profundidade apropriada para o ensaio;
4. fornecer os parâmetros geométricos do poço de monitoramento para o *software Winslug*<sup>®</sup>, instalado em *notebook*, bem como programar o tempo de ensaio e intervalo das medidas;
5. iniciar a aquisição dos dados;
6. inserir o tarugo de volume conhecido, abaixo do nível estático;
7. acompanhar em tempo real a evolução e a qualidade do ensaio através da tela do computador;
8. após o final do ensaio, calcular a condutividade hidráulica referente à inserção do tarugo;
9. reiniciar o ensaio através da retirada do tarugo;

10. limpar e descontaminar os equipamentos antes de ensaiar outro poço de monitoramento.

O tarugo utilizado nos testes de *slug* foi um cilindro de *nylon* maciço de 1”3/8 de diâmetro e 1 metro de comprimento. O volume do tarugo é igual a 983 cm<sup>3</sup> (1 litro aproximadamente), correspondendo a um deslocamento calculado do N.A de 48 cm em um tubo de 2”. O deslocamento de 48 cm do tarugo, também foi observado no poço experimental de 2”, da empresa American Drilling do Brasil, com auxílio de transdutor de pressão (Figura 12).

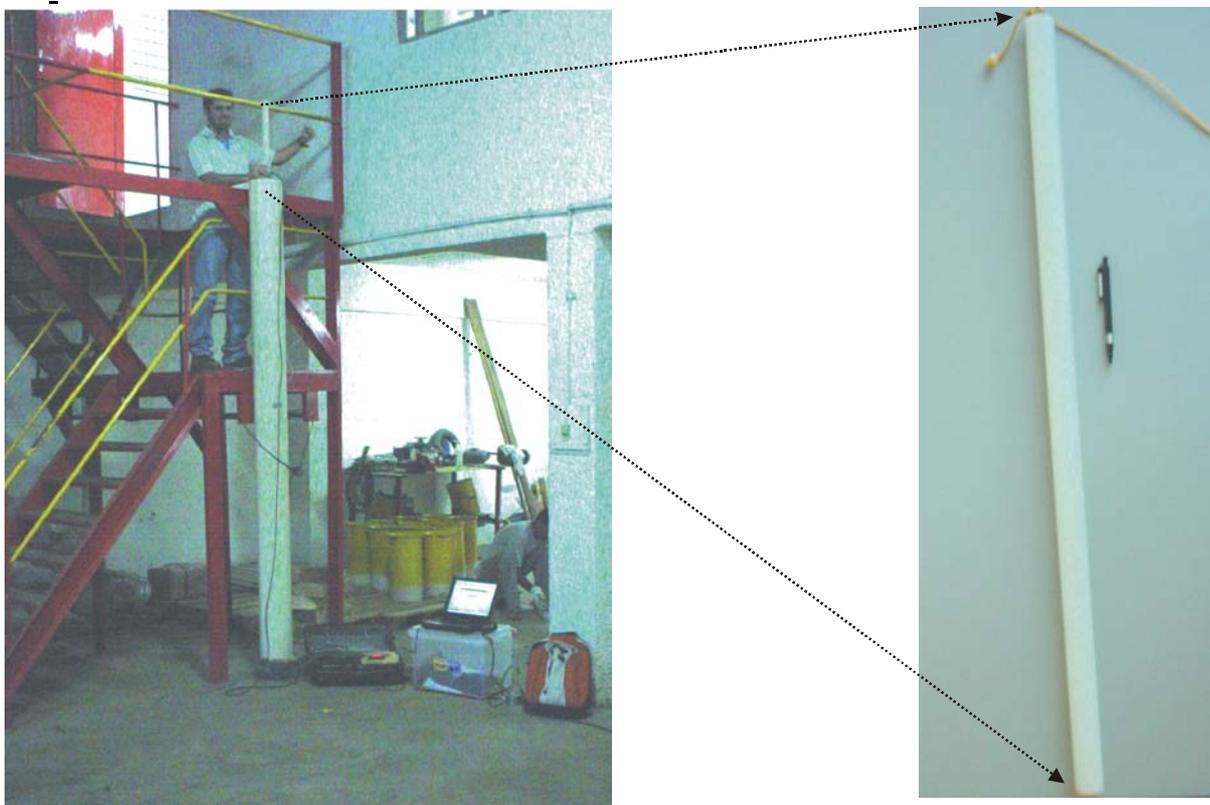


Figura 12: Poço experimental da American Drilling do Brasil. No detalhe, tarugo de *nylon*.

Para medição da variação dos níveis d’água, durante os testes de *slug*, foi utilizado transdutor de pressão, marca Druck, modelo PTX 1830 (Figura 13), com 25 m de cabo e tubo com respiradouro para correção automática da pressão barométrica. O transdutor possui corpo de titânio, resistente à corrosão. O modelo possui faixa de utilização de 30 PSI (21,09 m) e precisão de 0,1% (21,09 mm) do fundo de escala.

Os valores de pressão de coluna d'água, no diafragma do transdutor, são convertidos em sinais digitais por um receptor externo que os envia para um *notebook*. Periodicamente, antes dos ensaios, o transdutor é testado quanto à sua calibração.



Figura 13: Detalhe do transdutor de pressão Druck.

A leitura, armazenamento e a interpretação dos dados gerados durante os testes de *slug* foram efetuados automaticamente, utilizando o *software Winslug*<sup>®</sup> (Chang & Carnier Neto, 2000), desenvolvido nos laboratórios da UNESP, *campus* de Rio Claro.

O *software Winslug*<sup>®</sup> foi desenvolvido com finalidade de automatizar a realização de testes de condutividade hidráulica em poços de monitoramento. O programa é instalado em ambiente *Windows*<sup>®</sup>, permitindo facilmente a análise dos dados através de simples comandos.

A aquisição dos valores de variação de carga hidráulica, enviados pelo transdutor, pode ser efetuada a cada segundo (e.g, Figuras 8 e 14). Permite-se assim, uma análise acurada do teste de *slug*, principalmente no início, quando frequentemente observa-se o efeito de drenança do pré-filtro em apenas alguns segundos. Pode-se ainda estabelecer intervalos de tempo maiores para aquisição dos dados, diminuindo-se assim o tamanho do arquivo *.dat*.

Os métodos de análise de condutividade hidráulica, utilizados pelo *software Winslug*<sup>®</sup>, são: Hvorslev (1951) e Bouwer e Rice (1976,1989).

Os dados obtidos durante os testes de *slug* formam um arquivo permanente, editável somente durante a análise, possibilitando assim diferentes análises a partir de um mesmo arquivo.

Para a rotina de regressão da reta de análise, observa-se o gráfico e escolhem-se os pontos relativos ao intervalo proposto por Butler (1996), para cada método escolhido (Figura 14).

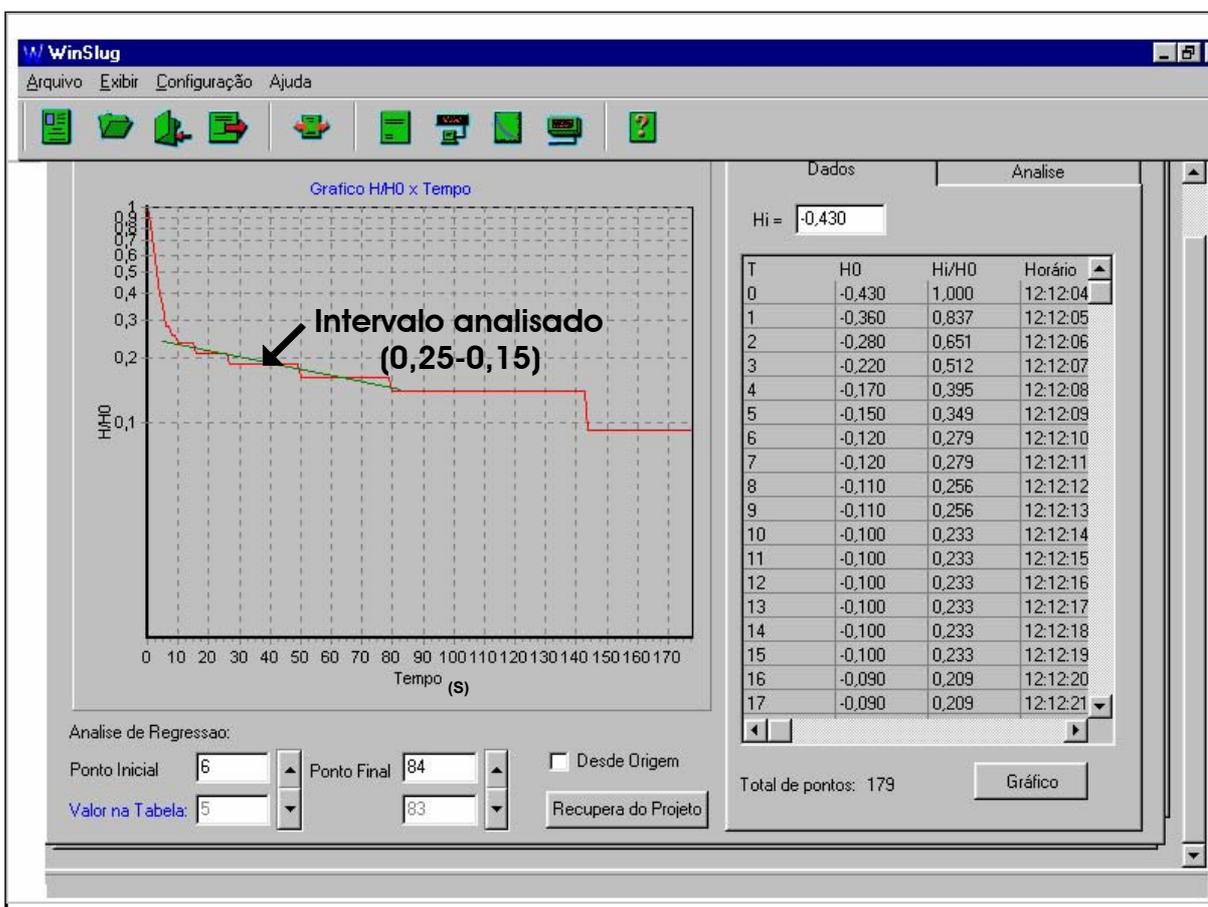


Figura 14: Tela do software *Winslug*<sup>®</sup> mostrando, à direita, os valores de tempo, carga hidráulica e carga hidráulica normalizada e à esquerda, valores escolhidos para regressão. O intervalo de análise refere-se ao proposto por Butler (1996) para o método de Hvorslev (1951)

O *software Winslug*<sup>®</sup> faz automaticamente a regressão da reta, calculando o valor para  $T_0$ , e automaticamente, junto com parâmetros geométricos previamente

fornecidos, calcula a condutividade hidráulica segundo o método de Hvorslev (1951) (Figura 15).

Para análise segundo o método de Bouwer & Rice, quando o nível d'água (NA) encontra-se no interior da coluna de filtros, deve-se fornecer a porosidade do pré-filtro. Deve-se fornecer também a espessura do aquífero (**h**) e a distância do nível d'água (NA) à base do filtro (**L<sub>w</sub>**).

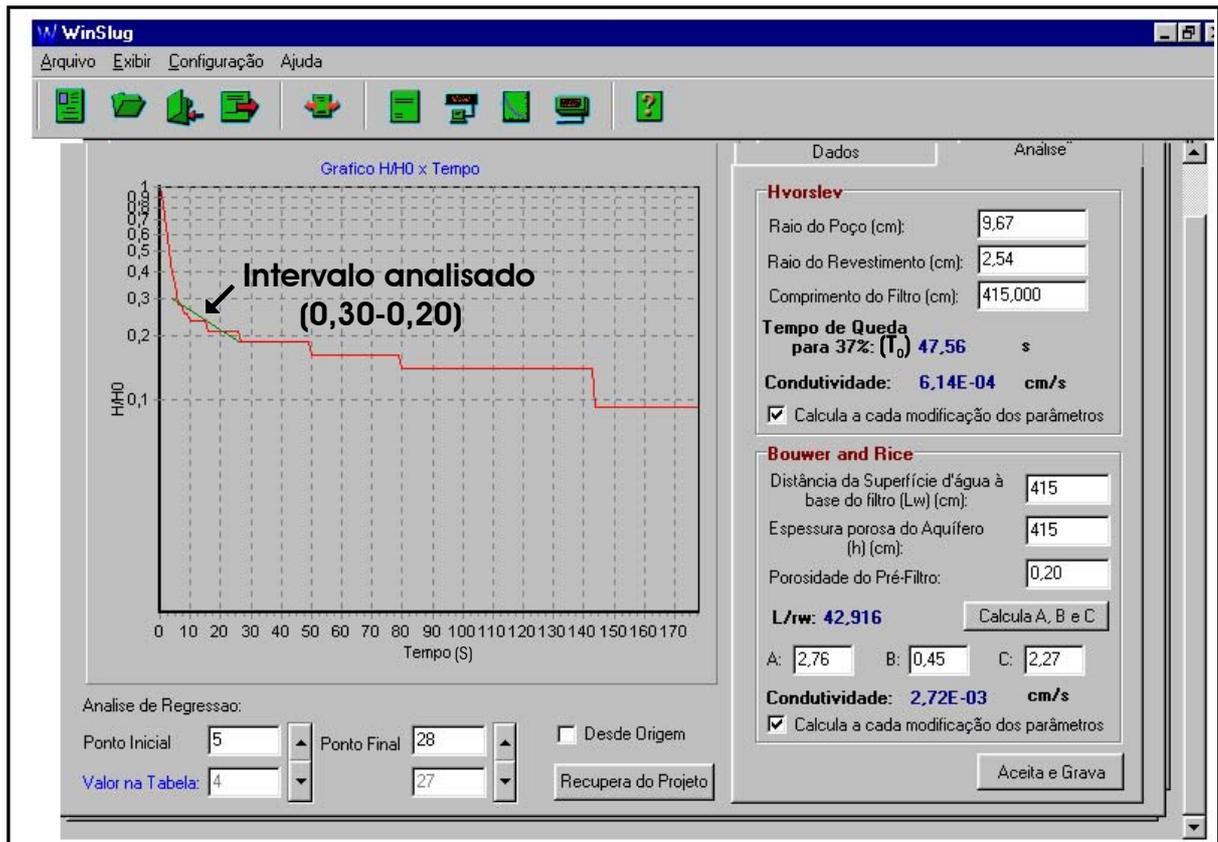


Figura 15: Tela do software *Winslug*<sup>®</sup> mostrando a direita os valores de T<sub>0</sub>, e condutividade hidráulica (método de Hvorslev) e os parâmetros relativos ao cálculo e o valor da condutividade hidráulica (método de Bouwer e Rice). O intervalo de análise refere-se ao proposto por Butler (1996) para o método de Bouwer e Rice (1976).

Anteriormente aos ensaios realizados para esta dissertação, o *software Winslug*<sup>®</sup>, foi testado de forma exaustiva e objetiva, através da realização de diversos ensaios de campo em diferentes domínios hidrogeológicos.

A facilidade de manuseio e operação do *software*, junto à portabilidade dos equipamentos utilizados, permite que os ensaios de testes de *slug* sejam realizados por somente uma pessoa. Sua operação mostrou-se ser simples, até mesmo para

interpretação dos dados no campo. A Figura 16 mostra os equipamentos utilizados nos testes.

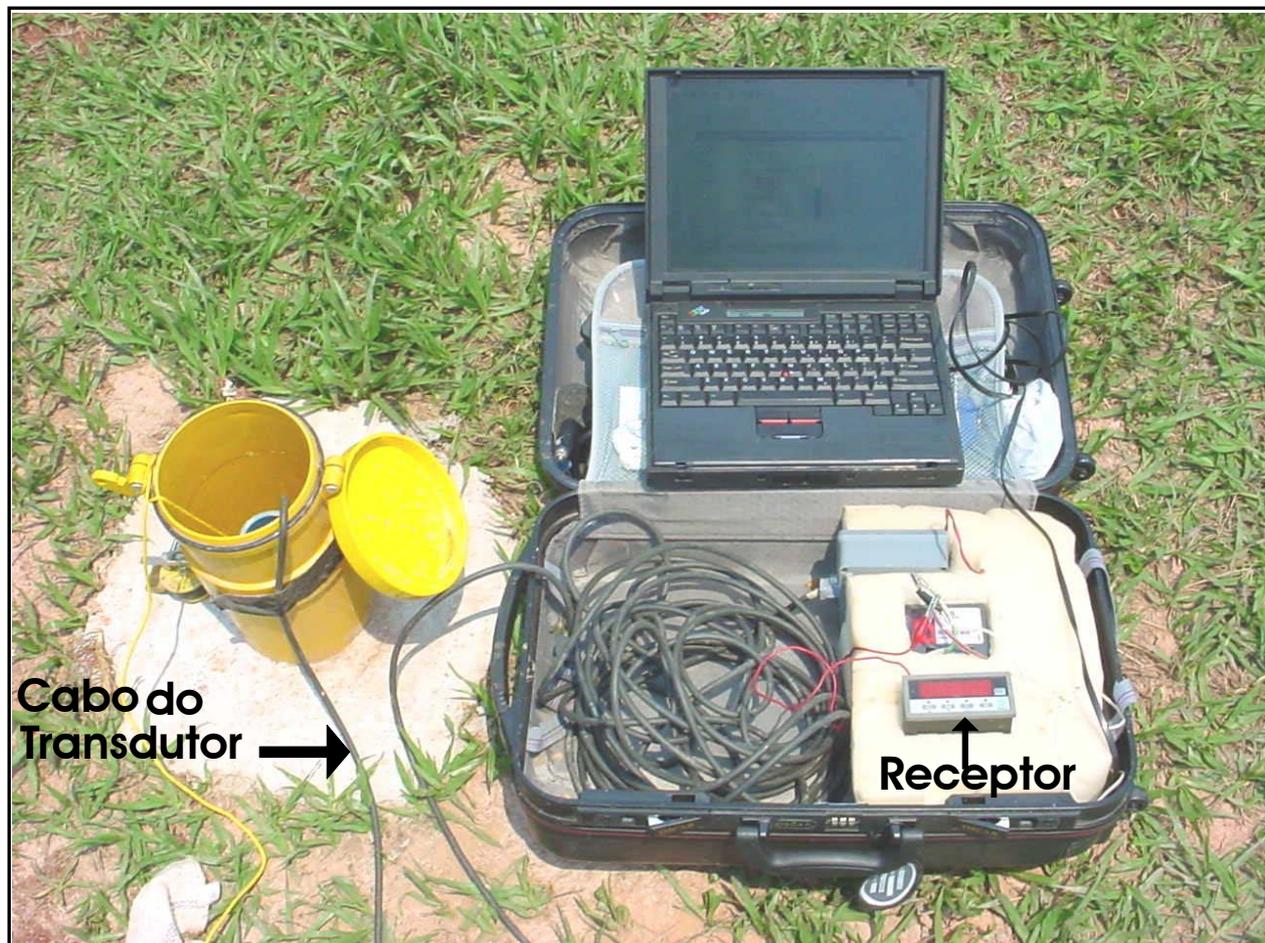


Figura 16: Equipamentos utilizados no teste de *slug* em poço de monitoramento localizado em Taboão da Serra - SP. O ensaio foi de inserção do tarugo. Notar a portabilidade dos equipamentos

## 5 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 5.1 – Localização da área

A área de estudo compreende a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), que abrange a Capital do Estado e mais 38 municípios circunvizinhos, conforme mostra a Figura 17. Ocupa uma área de 8.051 Km<sup>2</sup>, e possui uma população de cerca de 18 milhões de habitantes, sendo a maior aglomeração demográfica do Brasil. A RMSP situa-se geograficamente entre as coordenadas 273 a 429 km (E) e 7336 a 7440 km (N) na Unidade Transversal de Mercator (UTM), origem no Equador e Meridiano Central 45° W Gr, acrescidas as constantes 10.000 km e 500 km, respectivamente.

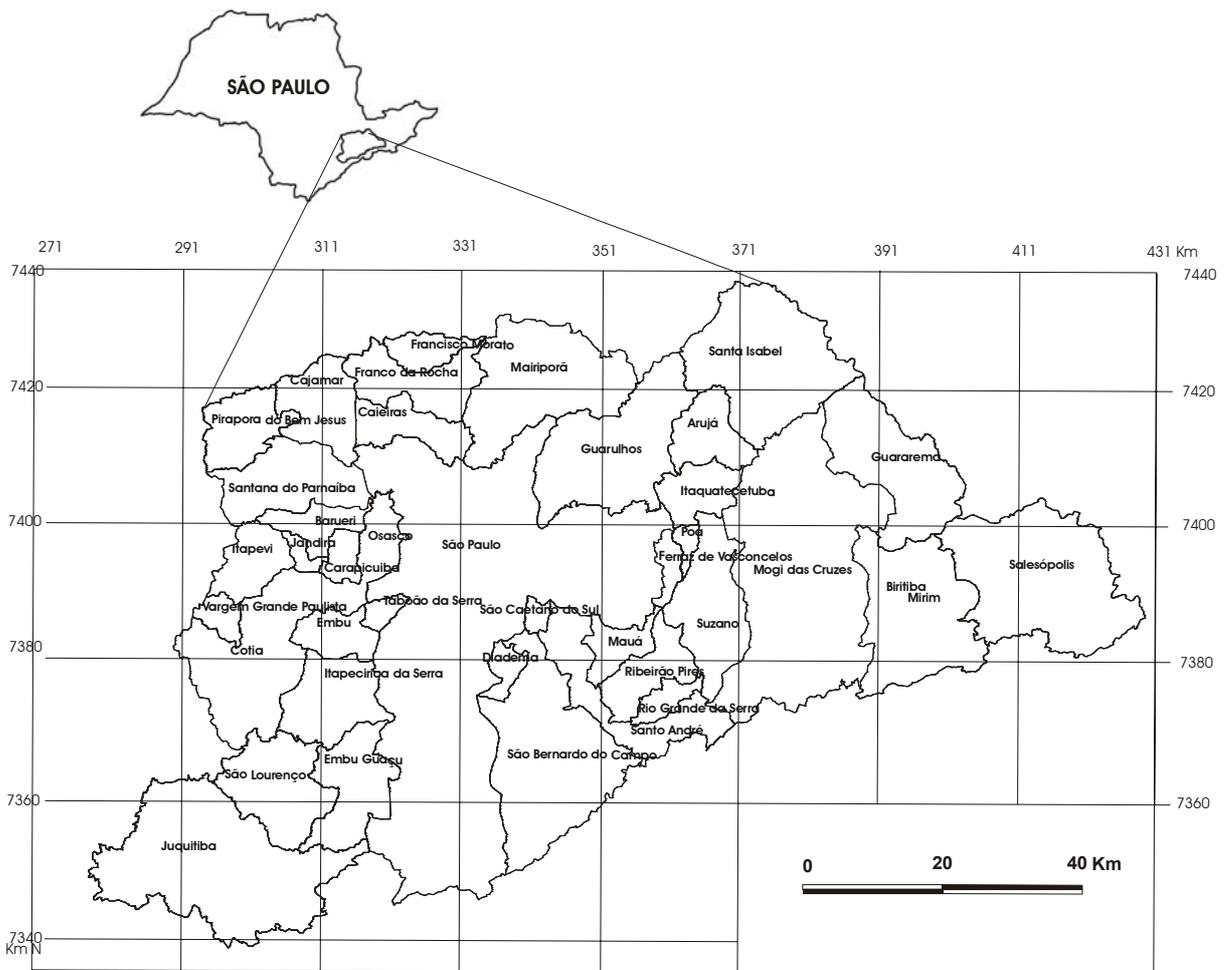


Figura 17: Mapa de localização da área de estudo

## 5-2 - Aspectos Climáticos

O clima da RMSP é do tipo tropical temperado de altitude, com temperatura média anual em torno de 25°C. As temperaturas elevadas ocorrem no período de novembro a março, com médias superiores a 27°C no mês de fevereiro. Nos meses de maio a agosto, as médias mensais são inferiores a 23°C, sendo julho o mês de mais baixa temperatura (12-14°C).

A região estudada apresenta precipitação média anual de 1400 mm, sendo que aproximadamente 60% deste total precipita durante o período de verão, entre os meses de dezembro a março, como mostra a Figura 18.

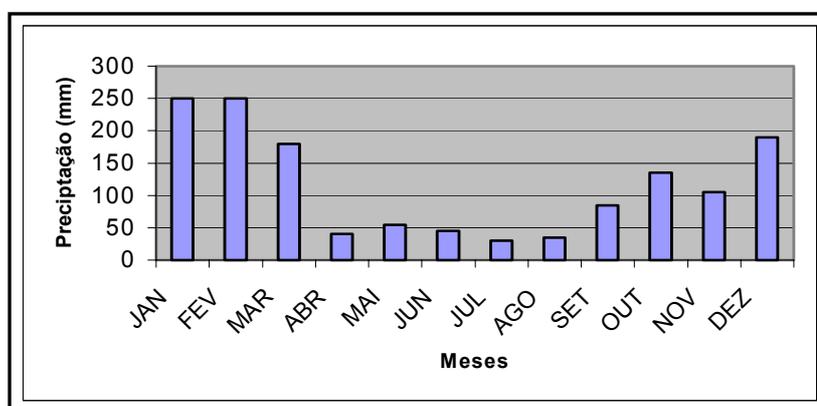


Figura 18: Precipitação média mensal na RMSP (DAEE 2002)

## 5.3 - Geomorfologia

A Região Metropolitana de São Paulo situa-se, de acordo com a divisão geomorfológica do Estado de São Paulo, proposta por Almeida (1964), na porção sudeste do compartimento de relevo denominado Planalto Atlântico Brasileiro, zona Planalto Paulistano.

O Planalto Paulistano apresenta relevo suave, com morros e espigões e altitudes médias variando entre 715 e 900m; é constituído, em sua maior parte, por filitos, micaxistos, gnaisses e migmatitos e intrusões graníticas. Na porção centro

norte, destaca-se a Bacia Sedimentar de São Paulo, de idade cenozóica, cortada pelo rio Tietê e alguns de seus afluentes (IPT, 1981a).

Segundo a classificação geomorfológica proposta pelo IPT (1981b), o embasamento cristalino presente na RMSP está relacionado à sub-zona da Morraria do Embu. A região é caracterizada por relevo de morros com declividades médias a altas, acima de 15 %, e amplitudes entre 100 a 300 m. As drenagens são de alta densidade, com vales fechados a abertos, e planícies aluvionares interiores restritas.

#### **5.4 - Contexto Geológico Regional**

A Região Metropolitana de São Paulo está assentada principalmente sobre terrenos cristalinos pré-cambrianos (85%). Na área central da RMSP, a cidade de São Paulo apresenta a quase totalidade da área urbana desenvolvida sobre a Bacia Sedimentar de São Paulo, de idade cenozóica.

O conhecimento geológico da RMSP teve grande impulso após 1980, com a realização da mesa redonda promovida pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE e Sociedade Brasileira de Geologia – SBG, intitulada “Aspectos Geológicos e Geotécnicos da Bacia Sedimentar de São Paulo”. Em abril de 1992, ABGE e SBG, em conjunto com a Associação Brasileira de Águas Subterrâneas – ABAS realizaram o seminário “Problemas Geológicos e Geotécnicos na Região Metropolitana”, cujos os artigos apresentados mostraram novos conceitos que possibilitaram o melhor entendimento da geologia da área.

Os terrenos cristalinos da RMSP, que representam a área de interesse desta dissertação, circundam os sedimentos da Bacia de São Paulo, e são caracterizados essencialmente por duas unidades geológicas, separadas pelas falhas de Taxaquara e do Rio Jaguari, além de rochas granitóides intrusivas. O conjunto situado a sul das falhas é denominado Complexo Embu e o conjunto a norte das falhas é subdividido nos grupos São Roque e Serra de Itaberaba (Juliani, 1992). Rodriguez (1998) destaca, através do trabalho de compilação de vários mapas, a presença, na porção extremo norte da área, de rochas do Grupo Amparo, e na porção extremo sudeste, de rochas do Complexo Costeiro. A Figura 19 ilustra a distribuição das principais unidades litoestratigráficas da RMSP.

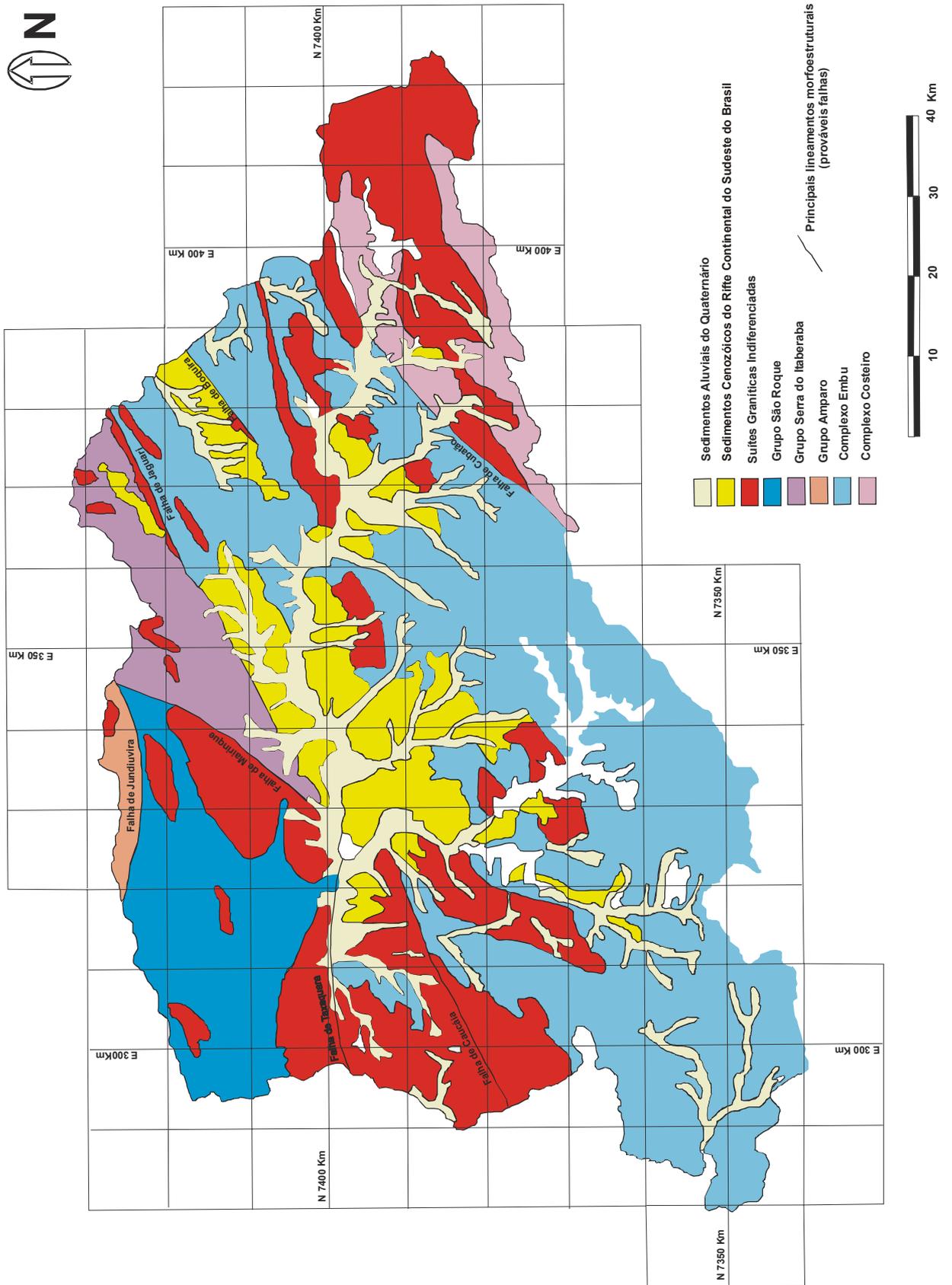


Figura 19 : Distribuição das grandes unidades litoestratigráficas da RMSP (modificado de Rodriguez 1998).

### 5.4.1 Unidades Litoestratigráficas

#### Complexo Costeiro

O Complexo Costeiro é constituído por rochas de fácies anfibolito e granulito, que sofreram migmatização e granitização em vários graus. Ocorre na porção extremo sudeste da área de estudo, sendo limitado ao norte pela falha de Cubatão e a leste por um corpo granítico.

Na RMSP, O Complexo Costeiro é representado por migmatitos, gnaisses graníticos porfiroblásticos, biotita gnaisses e gnaisses peraluminosos (Rodriguez, 1998). Para Tassinari *et al.* (1988), essas rochas sugerem idade Proterozóico superior.

#### Complexo Embu

O Complexo Embu ocupa a porção central da RMSP e constitui a mais expressiva unidade em termos de exposição. Esta unidade é limitada ao sul pela falha de Cubatão e ao norte pelas Falhas de Taxaquara e Jaguari.

Hasui & Sadowski (1976) definiram o Complexo Embu como formado por migmatitos e gnaisses migmatizados, gerados pelo metamorfismo de alto grau em metassedimentos do Complexo Pilar.

Para Juliani (1992) no Complexo Embu são reconhecidos três conjuntos de litotipos:

- rochas orto-gnáissicas polimigmatizadas e polideformadas, que constituem o embasamento das supracrustais e tem idades arqueanas a transamazônicas;
- metassedimentos de grau metamórfico elevado, parcialmente feldspatizados, caracterizado por xistos da fácies anfibolito médio a alto;
- sericita xistos e filitos de baixo grau metamórfico.

Segundo Tassinari *et al.* (1988), as rochas presentes nesta unidade sugerem idade Proterozóico superior.

## **Grupos São Roque e Serra de Itaberaba**

Os Grupos São Roque e Serra de Itaberaba ocupam a porção norte da RMSP. Entram em contato, ao sul, através do sistema de falhas de Taxaquara e Jaguari, com o Complexo Embu e, ao norte, através da falha de Jundiuvira, com o Grupo Amparo.

Hasui & Sadowski (1976) reconheceram o Grupo São Roque como um pacote metapelítico metamorizado em fácies xisto verde, localmente anfibolito.

No Grupo São Roque, a unidade mais amplamente distribuída é formada por filitos laminados e bandados, intensamente foliados. Outros tipos litológicos comuns no Grupo são os xistos, metaconglomerados, metarcóseos, metagrauvas, quartzitos, metarenitos e metabasitos (Coutinho, 1972).

O Grupo Serra do Itaberaba, situado a leste da falha do Mandaqui, foi separado do Grupo São Roque por Juliani *et al.* (1986), por apresentar xistos sem estruturas sedimentares preservadas e diferente grau e tipo de metamorfismo. Este grupo é essencialmente constituído por sequência meta-vulcano-sedimentar recoberta por sequência clástica-química. Os principais litotipos encontrados são xistos e metabasitos que apresentam grau metamórfico, em geral, na fácies anfibolito médio.

Para Tassinari *et al.* (1988), as rochas do Grupo São Roque sugerem idade Proterozóico médio.

## **Grupo Amparo**

O Grupo Amparo ocorre em uma pequena faixa na porção extremo norte da RMSP, acima da falha de Jundiuvira. É representado por gnaisses bandados, com intercalações de rochas metassedimentares. Segundo Rodriguez (1998), na região da RMSP predominam rochas xistosas com intercalações quartzíticas, freqüentemente migmatizadas e feldspatizadas.

Segundo IPT (1981 a), o Grupo Amparo admite idade transamazônica .

## Suítes Graníticas

Na RMSP afloram rochas granitóides de dimensões variando de batólitos a pequenos *stocks*, alguns recobertos pelos sedimentos da Bacia Sedimentar de São Paulo (Coutinho, 1980). Para Hasui *et al.* (1978b), essas rochas apresentam composição mineralógica variando de tonalítica a granítica, e em geral, apresentam indícios de cataclase, relacionados a falhamentos posteriores. Para Juliani (1992), a maioria dos granitóides presentes na RMSP estão relacionados à fácies Cantareira, tanto nos grupos São Roque e Serra do Itaberaba, como no Complexo Embu.

## Sedimentos Cenozóicos das Bacias de São Paulo e de Taubaté

Os sedimentos cenozóicos da Bacia de São Paulo ocupam a porção central da Região Metropolitana de São Paulo e a nordeste desta ocorrem os sedimentos cenozóicos da Bacia de Taubaté. Ambas bacias apresentam depósitos sedimentares arenosos e argilosos de sistema fluvial e lamíticos de leques aluviais, localmente ocorrem sedimentos pelíticos lacustres.

Para Riccomini (1989), as bacias de São Paulo e Taubaté integram o Rifte Continental do Sudeste do Brasil, compreendendo os depósitos continentais terciários. Os sedimentos terciários presentes na RMSP abrangem uma seqüência basal com as Formações Resende, Tremembé e São Paulo, agrupadas no Grupo Taubaté, e recobertas de forma discordante pela Formação Itaquaquetuba.

A Formação Resende, de idade oligocênica, representa mais de 80% do preenchimento sedimentar da Bacia de São Paulo. É caracterizada por depósitos fanglomeráticos (leque aluviais) que gradam para depósitos relacionados à planície aluvial de rios entrelaçados (*braided*) (Riccomini & Coimbra, 1992).

A Formação Tremembé, de origem lacustre e idade oligocênica, compreende camadas tabulares de argilas verdes maciças, intercaladas com argilas cinza escuro a pretas, ricas em matéria orgânica, de espessuras decimétricas. Os sedimentos da Formação Tremembé são mais freqüentes na Bacia de Taubaté e na RMSP aparecem de forma restrita ao sul do rio Tietê.

A Formação São Paulo, segundo Riccomini (1989), é representada por depósitos de sistema fluvial meandrante, sendo constituída por duas litofácies

principais. A primeira litofácies é representada por arenitos grossos, conglomeráticos com granodecrescência ascendente para siltitos e argilitos, relacionados a depósitos de canais meandранtes. A segunda litofácies é constituída por arenitos de granulação média a grossa, com granodecrescência ascendente para arenitos finos, siltito e argilito, correspondendo a depósitos de diques marginais e a planícies de inundação. Esta formação atinge, na região central da cidade de São Paulo, espessura de até 70 m.

A Formação Itaquaquecetuba está relacionada aos depósitos de sistema fluvial entrelaçado (*braided*) que ocorrem sob os aluviões holocênicos dos rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí. Caracteriza-se por arenitos médios a grossos, conglomerados, lamitos e blocos de rocha do embasamento. Sua espessura pode atingir até 130m (Riccomini & Coimbra, 1992).

### **Sedimentos Quaternários**

Os sedimentos quaternários, na Região Metropolitana de São Paulo, correspondem às extensas planícies aluviais associadas aos principais rios da região (Tietê, Pinheiros e Tamanduateí), presentes também ao longo das drenagens de menor porte.

Segundo Melo *et al.* (1986), os depósitos pleistocênicos compreendem colúvios argilo-arenosos e os holocênicos são representados por coluviões e aluviões depositados em várzeas e baixos terraços, com espessuras raramente ultrapassando 10 metros.

### **5.5- Aspectos tectônicos e estruturais**

Segundo Juliani (1992), as características geológicas mais destacadas na RMSP são as zonas de cisalhamento e as várias falhas menores normais, inversas e de empurrão associadas, denominada de Faixa de Cisalhamento de São Paulo por Hasui *et al.* (1984). As zonas de cisalhamento apresentam caráter dextral, orientadas segundo ENE a EW, ativas até o final do Ciclo Brasileiro no Cambro-Ordoviciano (Sadowski 1991, *apud* Riccomini *et al.* 1992), que geraram rochas desde cataclásticas a ultramilonitos.

Durante o Cenozóico, estas falhas foram reativadas em diversas ocasiões, como observado por Riccomini (1989), condicionando o embaciamento da Bacia Sedimentar de São Paulo e de Taubaté, determinando as várias fácies de sedimentos e imprimindo deformações aos mesmos.

No Grupo São Roque e no Complexo Embu, Hasui & Sadowski (1976) observaram dobras que apresentam estilo semelhante, podendo ser atribuído à fase de deformação comum. No entanto, no Grupo São Roque, essa deformação gerou xistosidade no plano axial. No Complexo Embu, a xistosidade é paralela à estratificação reliquiar e possui direção geral ENE. Na porção leste paulista, Fernandes (1991) descreveu cinco fases de dobramento nas rochas do Complexo Embu.

## 5.6 - Contexto Hidrogeológico da RMSP

A maior parte da área abrangida pela Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) (70%) pertence à Bacia do Alto Tietê (BAT), até a barragem de Pirapora. A BAT é uma unidade hidrológica que engloba os domínios da Bacia Sedimentar de São Paulo (1452 km<sup>2</sup>) e das rochas pré-cambrianas do embasamento cristalino (4.238 km<sup>2</sup>) que a circundam (Figura 20). Neste contexto, destacam-se dois sistemas aquíferos principais: O Sistema Aquífero Cristalino (SAC) e o Sistema Aquífero Sedimentar (SAS) (Hirata & Ferreira 2001).

O Sistema Aquífero Cristalino (SAC) corresponde às áreas das rochas cristalinas do embasamento, com limites coincidentes aproximadamente com os divisores de drenagem superficial, nas cotas de 800 a 1000 m. Este sistema é composto por duas unidades de natureza hidrogeológica distintas (Figura 21), como descritas a seguir.

Na primeira unidade, correspondente ao manto de intemperismo, as condições de ocorrência das águas subterrâneas são de aquífero livre em meio intergranular heterogêneo. A espessura média da porção intemperizada é da ordem de 50 m (SABESP/CEPAS-IGUSP 1994). A condutividade hidráulica é função do nível do perfil de alteração, variando de muito baixa ( $1 \times 10^{-4}$  a  $1 \times 10^{-5}$  cm/s) no terço superior do perfil, a muito alta ( $1 \times 10^{-1}$  a  $1 \times 10^{-2}$  cm/s) na zona de transição entre a rocha relativamente alterada e rocha sã (Rebouças & Cavalcante 1987, *apud* 45,

A segunda unidade corresponde ao aquífero cristalino, presente sob o manto de intemperismo, com o qual muitas vezes se encontra conectado hidraulicamente. Nesta unidade, a água circula através das discontinuidades da rocha (falhas e fraturas), caracterizando o aquífero como livre a semilivre, heterogêneo e isotrópico (DAEE, 1975).

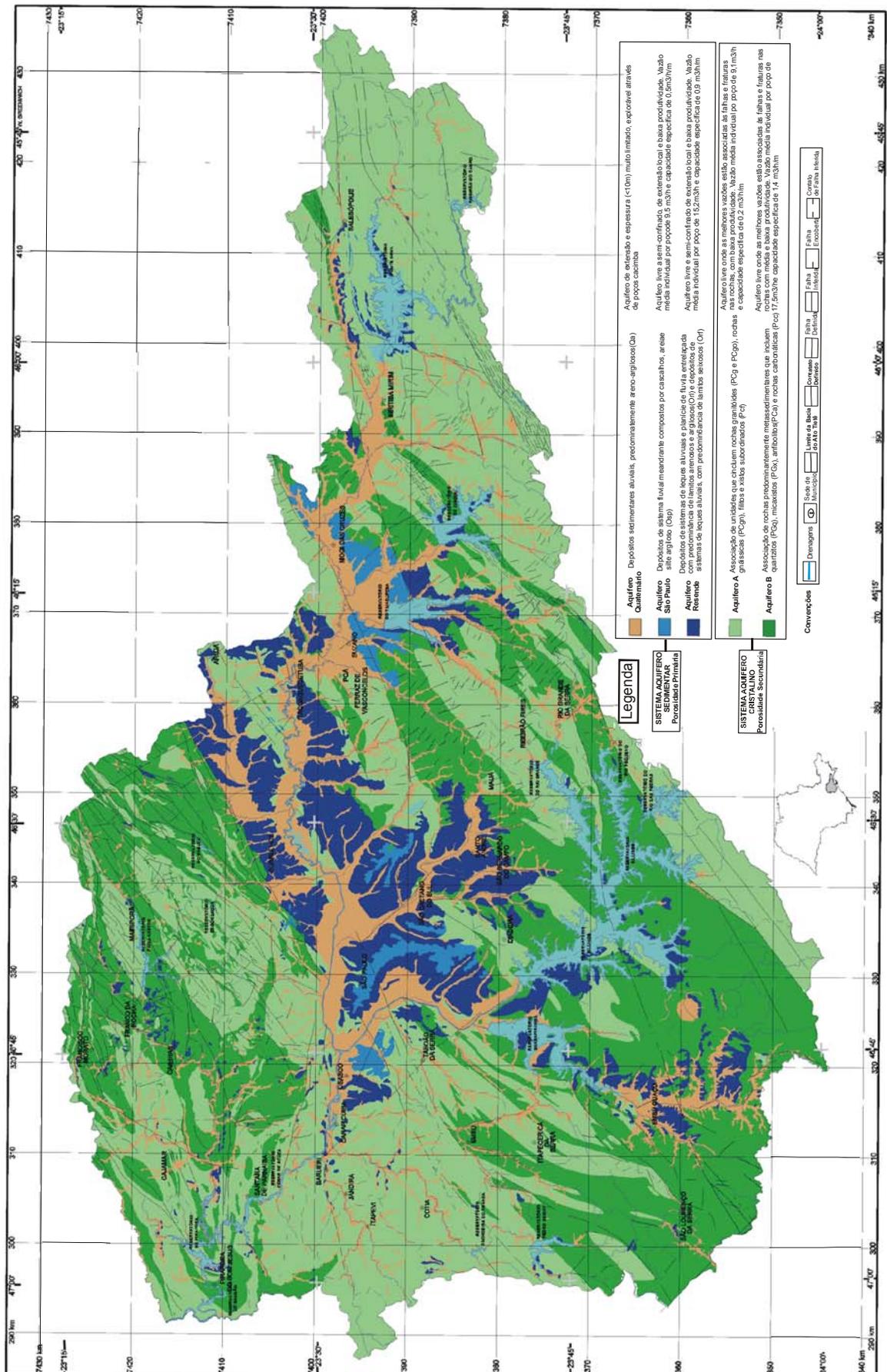


Figura 20 : Mapa de unidades hidrogeológicas, modificado de Hirata & Nunes da Silva (1999)

Quanto ao potencial hídrico do Sistema Aquífero Cristalino (SAC), Hirata & Ferreira (2001) observaram que as rochas granitóides apresentam capacidade específica (Q/s) média de 0,20 m<sup>3</sup>/h/m e as rochas metamórficas apresentam melhor produtividade, com Q/s média de 1,35 m<sup>3</sup>/h/m. (Tabela 3)

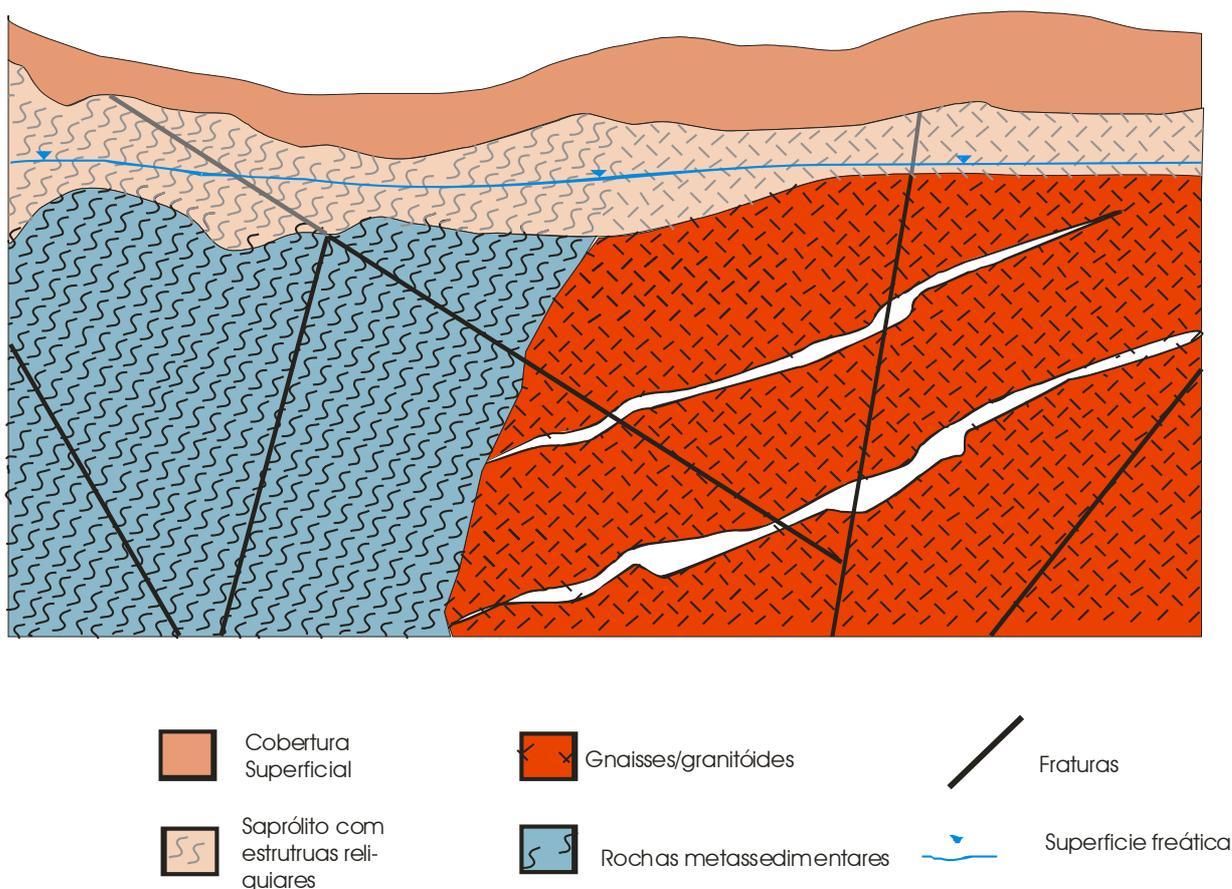


Figura 21 : Modelo conceitual do Sistema Aquífero Cristalino

O Sistema Aquífero Sedimentar (SAS) corresponde os sedimentos da Bacia de São Paulo, sendo o aquífero mais explorado da Bacia do Alto Tietê.

Para o Sistema Aquífero Sedimentar (SAS) foram definidas duas unidades: aquíferos São Paulo e Resende, ambos de natureza livre a localmente semi-confinados, heterogêneos, isotrópicos e de porosidade primária granular, apresentam produtividade baixa (Q/s=0,5 m<sup>3</sup>/h/m) e média-baixa (Q/s=0,9 m<sup>3</sup>/h/m),

respectivamente (Tabela 3). As formações neocenozóicas, Tremembé e Itaquaquacetuba, não definem unidades aquíferas, devido à sua pequena expressão em área, o mesmo ocorrendo para os depósitos associados à sedimentação quaternária, devido à pouca espessura.

Tabela 3. Produção individual por poço tubular para diferentes unidades aquíferas na Bacia do Alto Tietê (Hirata & Ferreira 2001)

Sistema Aquífero	Aquíferos Propostos	Número de poços estudados	Profundidade média dos poços (m)	Vazão média (m <sup>3</sup> /h)	Capacidade específica Q/s (m <sup>3</sup> /h/m)		
					média	mediana	desvio padrão
Sedimentar	São Paulo (Osp)	17	129	9,51	0,48	0,49	1,20
	Resende (Orl, Orf)	111	165,5	15,24	0,91	0,31	0,79
Cristalino	Rochas Granitóides (P∈f, P∈g, P∈go, P∈gn)	90	198,5	9,07	0,20	0,09	0,30
	Rochas Metassedimentares (P∈a, P∈q, P∈x)	73	176,4	17,48	1,35	0,29	4,63

- Osp Predominantemente camadas de areia e cascalho
- Orl Predominância de lamitos arenosos a argilosos, com seixos e fragmentos de quartzo
- Orf Predominância de lamitos seixosos com lamitos arenosos subordinados
- P∈f Predominância de filitos ocorrendo subordinadamente xistos
- P∈g Rochas granitóides predominantemente maciças de granulação variada
- P∈go Rochas granitóides orientadas e/ou foliadas, de granulação variada, incluindo porções gnáissicas, migmatíticas e blastomiloníticas associadas
- P∈gn Rochas predominantemente gnáissicas, incluindo, porções locais de rochas granitóides orientadas, xistos feldspatizados e milonitos diversos subordinados
- P∈a Anfibolitos
- P∈q Predominância de quartzitos, com ocorrências subordinadas de metassiltitos e xistos
- P∈x Predominância de micaxistos, com quartzitos e metassiltitos subordinados, localmente feldspatizados

## 6 – Condutividade Hidráulica do Embasamento Cristalino Alterado Saturado

Os xistos, gnaisses e granitos, presentes no embasamento cristalino na RMSP, quando alterados apresentam cores variegadas, com tons amarelados a avermelhados, como consequência da maior ou menor concentração de minerais máficos e do grau de alteração.

Nas áreas avaliadas por este trabalho, foram observados poucos afloramentos de rocha alterada. Em alguns cortes e taludes, foi possível observar a presença de solos saprolíticos de xistos e gnaisses, onde o bandamento composicional é marcado pelo contraste dos diferentes produtos de alteração de leitos micáceos alternados com quartzosos. A foliação, principalmente nos xistos alterados, é marcante e geralmente de alto ângulo.

A classificação das áreas estudadas, quanto aos tipos litológicos, baseou-se principalmente nas descrições dos perfis dos poços de monitoramento e, em alguns casos, quando a classificação não era possível, em afloramentos de rocha alterada presentes nas cercanias das áreas estudadas.

As áreas avaliadas neste estudo foram separadas em dois domínios: o primeiro relativo às rochas metassedimentares, com predominância dos xistos, e o segundo relativo às rochas granitóides, gnáissicas e migmatíticas. Essa divisão foi baseada no mapa de unidades hidrogeológicas (Figura 20) proposto por Hirata & Nunes da Silva (1999). A distribuição geográfica das áreas avaliadas na RMSP está representada na Figura 22.

No domínio das rochas metassedimentares, foram estudadas oito áreas, onde foram realizados testes de *slug* em 46 poços de monitoramento. As características construtivas dos poços e os resultados dos testes de condutividade hidráulica estão presentes nas Tabelas 4 e 5, respectivamente. Os gráficos relativos aos ensaios estão representados no Anexo I.

No domínio das rochas granitóides foram estudadas quatro áreas, onde foram realizados testes de *slug* em 17 poços de monitoramento. As características construtivas dos poços e os resultados dos testes de condutividade hidráulica estão presentes nas Tabelas 6 e 7, respectivamente. Os gráficos relativos aos ensaios estão representados no Anexo I.

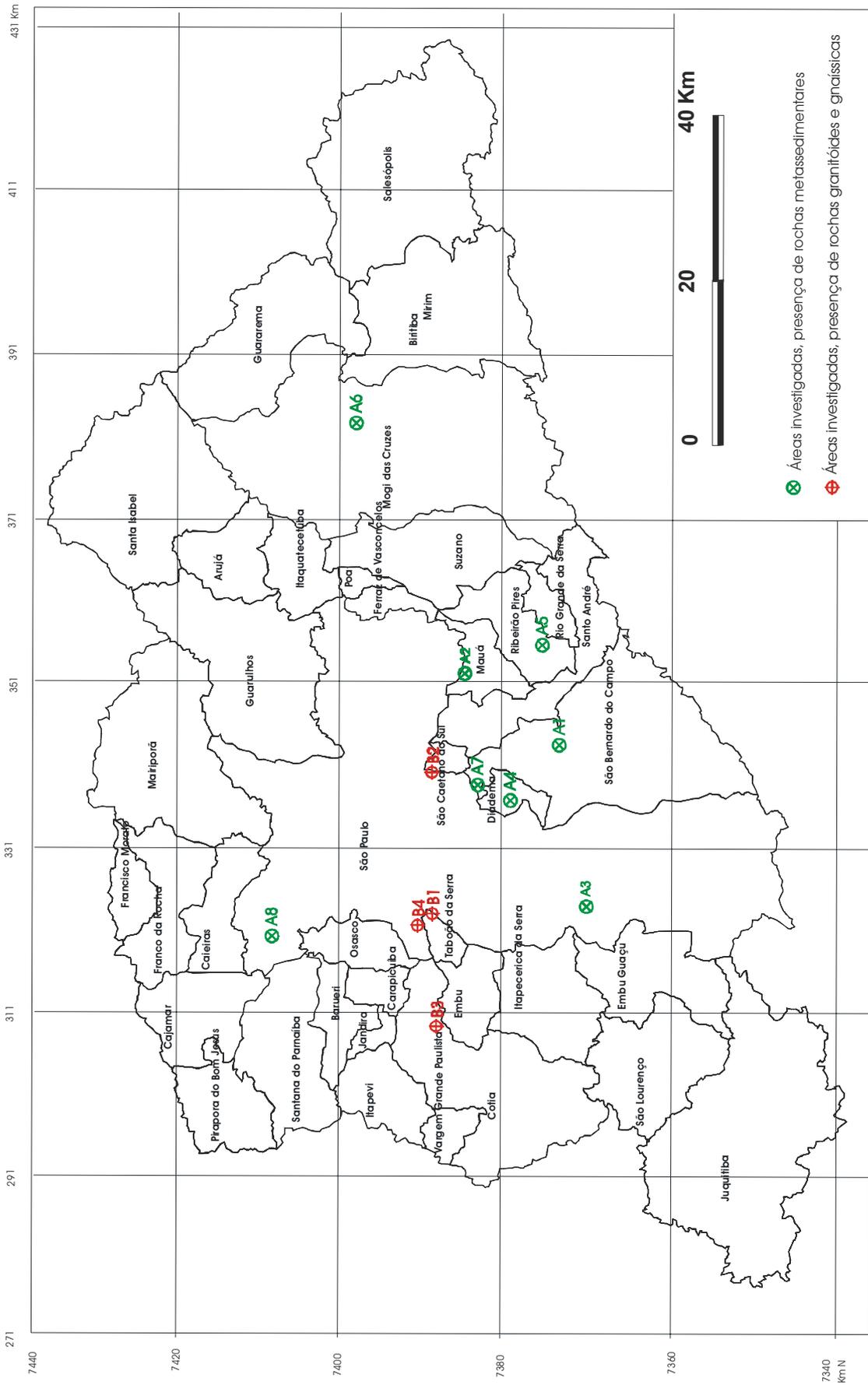


Figura 22: Áreas avaliadas quanto à condutividade hidráulica do embasamento cristalino alterado saturado.

O número limitado de ensaios, bem como a concentração das áreas avaliadas em algumas regiões da RMSP, mostra que as considerações levantadas aqui quanto aos valores de condutividade hidráulica do embasamento cristalino alterado saturado devem ser vistas com ressalvas, desaconselhando a adoção desses como valores referência.

Para interpretação dos ensaios de condutividade hidráulica aqui apresentados, não foi considerada a forte anisotropia, relacionada principalmente à foliação e ao bandamento composicional, presente na porção saturada do litotipos alterados. O meio saturado foi considerado como homogêneo e isotrópico. Não foi possível também quantificar o grau de desenvolvimento dos poços de monitoramento, embora previamente aos ensaios todos os poços tenham sido desenvolvidos.

Não obstante o universo de ensaios realizados para a caracterização da condutividade hidráulica fosse limitado, a metodologia aplicada no presente trabalho mostrou estar coerente com os fundamentos anteriormente descritos.

A utilização de transdutor de pressão, aliado ao uso do *software* Winslug®, mostrou ser adequada na caracterização da condutividade hidráulica do meio saturado do embasamento cristalino alterado na RMSP.

O tratamento estatístico dos dados de condutividade hidráulica foi realizado tanto para os dois domínios hidrogeológicos separadamente, como para o conjunto total dos dados.

Os valores de condutividade hidráulica, obtidos através dos métodos de Hvorslev (1951) e Bower & Rice (1976), foram analisados através de histogramas. Nesta análise, os valores de condutividade foram agrupados através de intervalos de classe.

No cálculo da média da condutividade hidráulica, optou-se pelo uso da média geométrica como proposto por Fetter (2001). Para este 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 análises estatísticas foram realizadas através do programa *Statistica for Windows (1995)*, da empresa StatSoft, Inc.

## 6.2 - Condutividade Hidráulica das Rochas Metassedimentares Alteradas Saturadas.

As rochas metassedimentares apresentam ampla distribuição geográfica, principalmente na porção ocupada do embasamento cristalino presente na RMSP. Este fato, em si, demonstra a necessidade de melhor conhecimento das características geológicas e hidrogeológicas deste domínio litológico.

Para análise da condutividade hidráulica das rochas metassedimentares alteradas, contou-se com um universo de 46 testes de *slug*, realizados em oito áreas distribuídas em diferentes localidades da RMSP. Embora a gama de litotipos seja ampla, nas rochas metassedimentares os ensaios foram realizados na porção alterada definida como xistosa, uma vez que a classificação litológica detalhada seria impossível, dado o alto grau de alteração das amostras obtidas e dos afloramentos presentes.

Entre as oito áreas avaliadas, sete estão inseridas nas áreas de afloramento das rochas do Complexo Embu e apenas a área A7, situada na porção norte da RMSP, encontra-se inserida dentro do pacote de rochas do Grupo São Roque.

A concentração das áreas avaliadas, na porção sul da RMSP (Figura 22), está relacionada ao fato desta porção ser a mais industrializada e, portanto, a mais suscetível à demanda de estudos ambientais.

Na porção leste da RMSP, na área A6, situada no município de Mogi das Cruzes, foi possível observar uma rara exposição de xistos alterados. Na porção superior do afloramento (Figura 23 A) nota-se a presença de solo marrom claro, de espessura métrica, bem desenvolvido. Na porção inferior, era evidente a presença de xistos alterados (saprólito) bastante friáveis, servindo, inclusive, de material de empréstimo para obras civis (Figura 23 B). Nesta porção alterada de coloração marrom variegada, observou-se, ainda, foliação de médio ângulo paralela ao bandamento composicional (Figura 23 D).

Na porção saprolítica dos xistos da área A6, foram instalados quatro poços de monitoramento. Na figura 23 C, está representada a descrição geológica e o gráfico de resistência à penetração (SPT) do poço TS 29. Os valores elevados de resistência à penetração coincidem com a porção saturada da alteração.

De maneira geral, através da análise dos perfis dos poços de monitoramento, as áreas de rochas metassedimentares alteradas, avaliadas neste trabalho, apresentaram a porção saturada coincidente com as porções saprolíticas do perfil de alteração.

Os parâmetros hidrogeológicos e construtivos dos poços de monitoramento estão presentes na Tabela 4. Os valores da condutividade hidráulica e os gráficos obtidos dos testes de *slug* estão presentes na Tabela 5 e Anexo I, respectivamente.

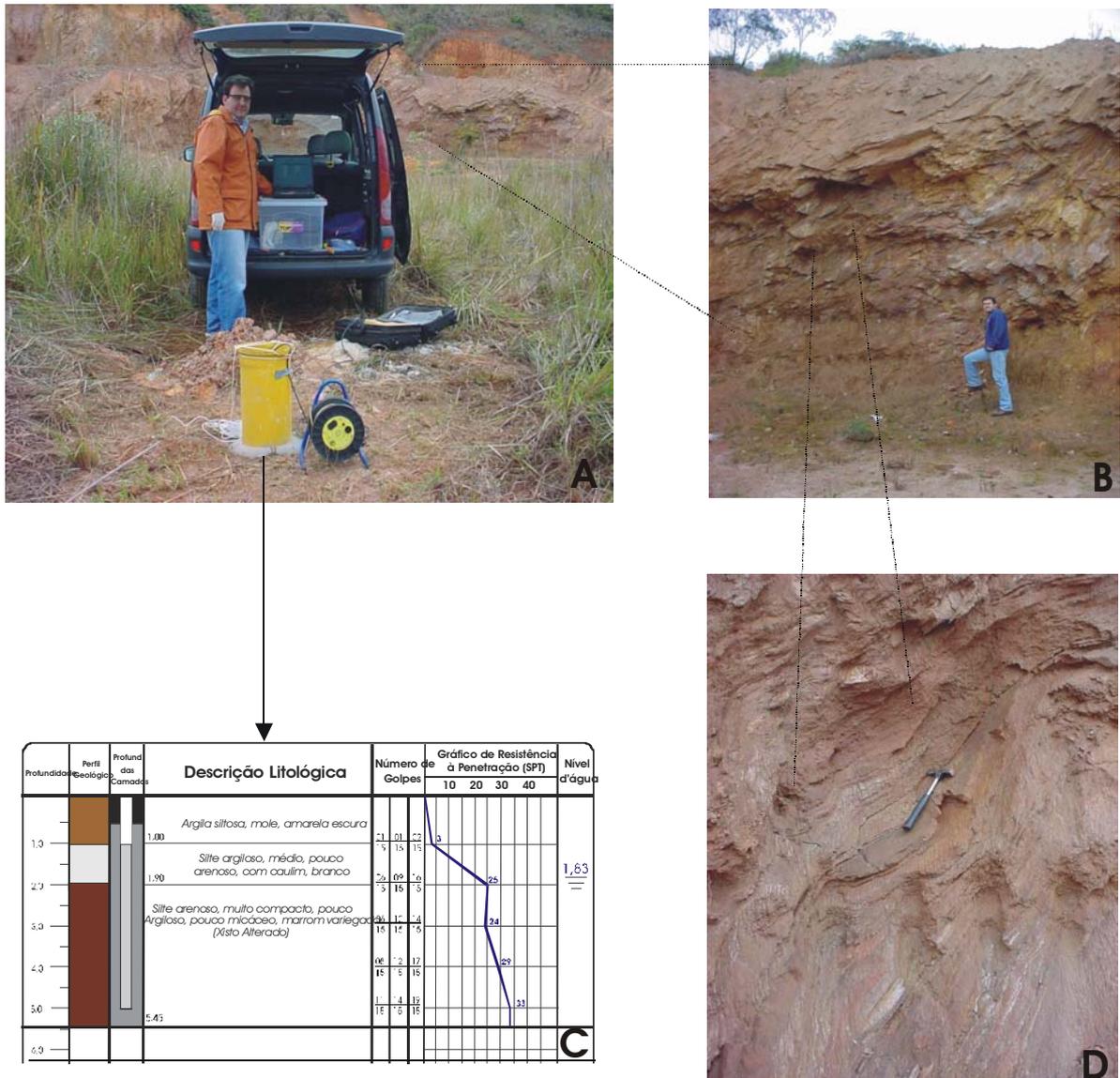


Figura 23

- A. Afloramento de xisto alterado, com presença no terço superior de solo marrom claro. Em primeiro plano, poço de monitoramento TS 29.
- B. Detalhe da foto A, mostrando a porção saprolítica do xisto.
- C. Descrição litológica e gráfico de resistência à penetração do poço de monitoramento TS 29.
- D. Detalhe da foto B mostrando plano de foliação e bandamento composicional.

Tabela 4 - Parâmetros hidrogeológicos e construtivos dos poços de monitoramento instalados em áreas de rochas metassedimentares alteradas.

Local	Poço	Litologia predominante	Método de Perfuração	Profundidade total (cm)	Nível d'água (NA) (cm)	Raio da perfuração (rw) (cm)	Raio do tubo (rc) (cm)	Posição do filtro (cm)	Comprimento efetivo do filtro (Le)(cm)	Distancia do NA à base do filtro (Lw) <sup>a</sup> (cm)	Porção analisada do aquífero (cm)
S.B.C. (A1)	TS 01	xisto	Trado manual	1100	599	5,08	2,54	700 a 1100	400	501	700 a 1100
S.B.C. (A1)	TS 02	xisto	HSA	2500	902	10,40	2,54	1700 a 2500	800	1598	1700 a 2500
S.B.C. (A1)	TS 03	xisto	Trado manual	1200	701	5,08	2,54	800 a 1200	400	499	800 a 1200
S.B.C. (A1)	TS 04	xisto	HSA	1200	941	7,62	2,54	800 a 1200	259	259	941 a 1200
S.B.C. (A1)	TS 05	xisto	HSA	2450	1455	10,40	2,54	2050 a 2450	400	995	2050 a 2450
S.B.C. (A1)	TS 06	xisto	HSA	3032	1730	10,40	2,54	2432 a 3032	600	1302	2432 a 3032
S.B.C. (A1)	TS 07	xisto	Trado manual	1250	982	5,08	2,54	850 a 1250	276	276	974 a 1250
S.B.C. (A1)	TS 08	xisto	Trado manual	980	456	5,08	2,54	580 a 980	400	524	580 a 980
S.B.C. (A1)	TS 09	xisto	HSA	1190	718	10,40	2,54	790 a 1190	400	472	790 a 1190
Mauá (A2)	TS 10	xisto	HSA	1400	582	7,62	2,54	700 a 1400	700	818	700 a 1400
Mauá (A2)	TS 11	xisto	HSA	1300	851	7,62	2,54	900 a 1300	400	449	900 a 1300
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-12A	xisto	HSA	1800	1352	10,40	2,54	1700 a 1800	100	448	1700 a 1800
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-12B	xisto	HSA	2400	1368	10,40	2,54	2350 a 2400	50	1032	2350 a 2400
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-12C	xisto	HSA	2970	1410	10,40	2,54	2920 a 2970	50	1560	2920 a 2970
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-13B	xisto	HSA	650	179	10,40	2,54	600 a 650	50	471	600 a 650
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-13C	xisto	HSA	1050	163	10,40	2,54	1000 a 1050	50	887	1000 a 1050
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-14A	xisto	HSA	1350	1160	10,40	2,54	1300 a 1350	50	190	1300 a 1350
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-14B	xisto	HSA	1650	1173	10,40	2,54	1600 a 1650	50	477	1600 a 1650
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-14C	xisto	HSA	2350	1195	10,40	2,54	2300 a 2350	50	1155	1600 a 1650

TS-Mn = poço multinível.

HSA = *Hollow Stem Auger*

S.B.C = São Bernardo do Campo

(Lw)<sup>a</sup> = h (espessura do aquífero)

Tabela 4 (continuação) - - Parâmetros hidrogeológicos e construtivos dos poços de monitoramento instalados em áreas de rochas metassedimentares alteradas

Local	Poço	Litologia predominante	Método de Perfuração	Profundidade total (cm)	Nível d'água (NA) (cm)	Raio da perfuração (rw) (cm)	Raio do tubo (rc) (cm)	Posição do filtro (cm)	Comprimento efetivo do filtro (Le)(cm)	Distancia do NA à base do filtro (Lw) <sup>a</sup> (cm)	Porção analisada do aquífero (cm)
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-15R	xisto	HSA	2400	1715	10,40	2,54	2200 a 2400	200	685	2200 a 2400
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-15P	xisto	HSA	3000	1757	10,40	2,54	2900 a 3000	100	1243	2900 a 3000
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-16R	xisto	HSA	1500	1272	10,40	2,54	1300 a 1500	200	228	1300 a 1500
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-16P	xisto	HSA	2500	1284	10,40	2,54	2400 a 2500	100	1216	2400 a 2500
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-17R	xisto	HSA	600	277	10,40	2,54	300 a 500	200	323	300 a 500
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-17P	xisto	HSA	1500	304	10,40	2,54	1400 a 1500	100	1196	1400 a 1500
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-18R	xisto	HSA	1000	440	10,40	2,54	800 a 1000	200	560	800 a 1000
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-18P	xisto	HSA	2100	459	10,40	2,54	2000 a 2100	100	1641	2000 a 2100
Diadema (A4)	TS 19	xisto	HSA	750	330	7,62	2,54	350 a 750	400	420	350 a 750
Diadema (A4)	TS 20	xisto	HSA	1900	422	10,40	5,08	1200 a 1900	700	1478	1200 a 1900
Diadema (A4)	TS 21	xisto	Trado manual	400	90	5,08	2,54	100 a 400	300	310	100 a 400
Diadema (A4)	TS 22	xisto	Trado manual	900	95	5,08	2,54	600 a 900	300	805	600 a 900
Diadema (A4)	TS 23	xisto	Trado manual	430	90	5,08	2,54	230 a 430	200	340	230 a 430
Ribeirão Pires (A5)	TS 24	xisto	Trado manual	500	46	5,08	2,54	100 a 500	400	454	100 a 500
Ribeirão Pires (A5)	TS 25	xisto	Trado manual	500	120	5,08	2,54	100 a 500	380	380	120 a 500
Ribeirão Pires (A5)	TS 26	xisto	Trado manual	500	123	5,08	2,54	100 a 500	377	377	123 a 500
Ribeirão Pires (A5)	TS 27	xisto	Trado manual	600	408	5,08	2,54	100 a 600	192	192	408 a 600
Ribeirão Pires (A5)	TS 28	xisto	Trado manual	500	96	5,08	2,54	200 a 500	300	404	200 a 500

TS-Mn = poço multinível.

(Lw)<sup>a</sup> = h (espessura do aquífero)

HSA = *Hollow Stem Auger*

Tabela 4 (continuação) Parâmetros hidrogeológicos e construtivos dos poços de monitoramento instalados em áreas de rochas metassedimentares alteradas.

Local	Poço	Litologia predominante	Método de Perfuração	Profundidade total (cm)	Nível d'água (NA) (cm)	Raio da perfuração (rw) (cm)	Raio do tubo (rc) (cm)	Posição do filtro (cm)	Comprimento efetivo do filtro (Le)(cm)	Distancia do NA à base do filtro (Lw) <sup>a</sup> (cm)	Porção analisada do aquífero (cm)
Mogi das Cruzes (A6)	TS 29	xisto	Trado manual	500	183	5,08	2,54	100 A 500	317	317	183 a 500
Mogi das Cruzes (A6)	TS 30	xisto	Trado manual	400	131	5,08	2,54	100 a 400	269	269	131 a 400
Mogi das Cruzes (A6)	TS 31	xisto	Trado manual	600	338	5,08	2,54	200 a 600	262	262	338 a 600
Mogi das Cruzes (A6)	TS 32	xisto	Trado manual	1100	936	5,08	2,54	700 a 1100	164	164	936 a 1100
S.B.C (A7)	TS 33	xisto	Trado manual	2560	2161	5,08	2,54	2060 a 2560	399	399	2161 a 2560
S.B.C (A7)	TS 34	xisto	Trado manual	2600	2271	5,08	2,54	2200 a 2600	329	329	2271 a 2600
S.B.C (A7)	TS 35	xisto	Trado manual	2200	1642	5,08	2,54	1800 a 2200	400	558	1800 a 2200
São Paulo - Perus (A8)	TS 36	xisto	HSA	2450	1640	10,40	5,08	1450 a 2450	810	810	1640 a 2450
São Paulo - Perus (A8)	TS 37	xisto	HSA	3150	2260	10,40	5,08	2150 a 3150	890	890	2260 a 3150

S.B.C = São Bernardo do Campo

(Lw)<sup>a</sup> = h (espessura do aquífero)

HSA = *Hollow Stem Auger*

Tabela 5: Valores de condutividade hidráulica obtidos de poços de monitoramento instalados em áreas de rochas metassedimentares alteradas.

Local	Poço	L e/rw	Método de Hvorslev		Método de Bower & Rice		
			To (s)	Condutividade hidráulica (cm/s)	Drenança do pré-filtro/porosidade	To (s)	Condutividade hidráulica (cm/s)
S.B.C. (A1)	TS 01	78,74	376	<b>9,36E-05</b>	não	170	<b>1,51E-04</b>
S.B.C. (A1)	TS 02	76,92	332	<b>5,27E-05</b>	não	418	<b>4,85E-05</b>
S.B.C. (A1)	TS 03	78,74	1136	<b>3,10E-05</b>	não	803	<b>3,47E-05</b>
S.B.C. (A1)	TS 04	33,99	2620	<b>1,68E-05</b>	sim/0,20	1729	<b>4,50E-05</b>
S.B.C. (A1)	TS 05	38,46	167	<b>1,76E-04</b>	não	60	<b>4,18E-04</b>
S.B.C. (A1)	TS 06	57,69	282	<b>7,71E-05</b>	não	223	<b>1,35E-04</b>
S.B.C. (A1)	TS 07	54,33	469	<b>1,02E-05</b>	sim/0,20	507	<b>1,14E-04</b>
S.B.C. (A1)	TS 08	78,74	231	<b>1,52E-04</b>	não	258	<b>1,04E-04</b>
S.B.C. (A1)	TS 09	38,46	592	<b>4,97E-05</b>	não	630	<b>3,80E-05</b>
Mauá (A2)	TS 10	91,86	412	<b>5,05E-05</b>	não	264	<b>5,67E-05</b>
Mauá (A2)	TS 11	52,49	357	<b>8,93E-05</b>	não	337	<b>9,33E-05</b>
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-12A	9,55	3498	<b>2,08E-05</b>	não	3498	<b>2,77E-05</b>
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-12B	4,78	3097	<b>3,26E-05</b>	não	3097	<b>3,31E-05</b>
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-12C	4,78	53820	<b>1,86E-06</b>	não	53820	<b>3,42E-06</b>
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-13B	4,78	3241	<b>3,15E-05</b>	não	3241	<b>3,72E-05</b>
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-13C	4,78	20864	<b>4,83E-06</b>	não	20864	<b>9,70E-06</b>
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-14A	4,78	451	<b>1,61E-04</b>	não	451	<b>2,34E-04</b>
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-14B	4,78	1605	<b>6,09E-05</b>	não	1605	<b>9,38E-05</b>
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-14C	4,78	1919	<b>5,28E-05</b>	não	1176	<b>1,25E-04</b>
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-15R	19,23	38750	<b>1,23E-06</b>	não	38750	<b>1,10E-06</b>
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-15P	9,61	36299	<b>2,01E-06</b>	não	36299	<b>2,93E-06</b>
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-16R	19,23	352	<b>1,35E-04</b>	não	399	<b>1,10E-04</b>
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-16P	9,61	180	<b>4,05E-04</b>	não	240	<b>5,09E-04</b>
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-17R	19,23	448	<b>1,06E-04</b>	sim/0,20	361	<b>5,37E-04</b>
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-17P	9,61	837	<b>8,72E-05</b>	não	576	<b>1,84E-04</b>
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-18R	19,23	629	<b>7,57E-05</b>	não	607	<b>7,84E-05</b>
São Paulo Parelheiros (A3)	TS-MN-18P	9,61	658	<b>1,11E-04</b>	não	508	<b>1,90E-04</b>

S.B.C = São Bernardo do Campo

TS-MN = poço multinível.

Tabela 5 (continuação): Valores de condutividade hidráulica obtidos de poços de monitoramento instalados em áreas de rochas metassedimentares alteradas.

Local	Poço	Le/rw	Método de Hvorslev		Método de Bower & Rice		
			To (s)	Condutividade hidráulica (cm/s)	Drenança do pré-filtro/porosidade	To (s)	Condutividade hidráulica (cm/s)
Diadema (A4)	TS 19	52,49	220	<b>1,45E-04</b>	sim/0,20	49	<b>1,01E-03</b>
Diadema (A4)	TS 20	67,30	1185	<b>6,55E-05</b>	não	883	<b>1,08E-04</b>
Diadema (A4)	TS 21	59,05	344	<b>1,27E-04</b>	sim/0,20	327	<b>1,77E-04</b>
Diadema (A4)	TS 22	59,05	85	<b>5,11E-04</b>	sim/0,20	72	<b>5,21E-04</b>
Diadema (A4)	TS 23	39,37	516	<b>1,15E-04</b>	não	505	<b>1,14E-04</b>
Ribeirão Pires (A5)	TS 24	78,43	503	<b>6,98E-05</b>	Não	358	<b>9,81E-05</b>
Ribeirão Pires (A5)	TS 25	74,51	630	<b>5,80E-05</b>	sim/0,20	353	<b>1,15E-04</b>
Ribeirão Pires (A5)	TS 26	73,92	11236	<b>3,28E-06</b>	sim/0,20	10589	<b>6,50E-06</b>
Ribeirão Pires (A5)	TS 27	37,64	187	<b>3,26E-04</b>	sim/0,20	278	<b>4,16E-04</b>
Ribeirão Pires (A5)	TS 28	59,05	380	<b>1,15E-04</b>	não	286	<b>1,27E-04</b>
Mogi das Cruzes (A6)	TS 29	62,40	409	<b>1,03E-04</b>	sim/0,20	309	<b>1,62E-04</b>
Mogi das Cruzes (A6)	TS 30	52,95	32	<b>1,47E-03</b>	sim/0,20	28	<b>2,27E-03</b>
Mogi das Cruzes (A6)	TS 31	51,57	2514	<b>1,93E-05</b>	sim/0,20	1644	<b>3,62E-05</b>
Mogi das Cruzes (A6)	TS 32	32,28	1691	<b>4,04E-05</b>	sim/0,20	735	<b>1,38E-04</b>
S.B.C (A7)	TS 33	78,54	1588	<b>2,22E-05</b>	sim/0,20	1119	<b>3,50E-05</b>
S.B.C (A7)	TS 34	64,76	3271	<b>1,25E-05</b>	sim/0,20	4846	<b>1,88E-05</b>
S.B.C (A7)	TS 35	78,74	1866	<b>1,89E-05</b>	não	1866	<b>2,84E-05</b>
São Paulo - Perus (A8)	TS 36	77,88	726	<b>9,55E-05</b>	sim/0,20	714	<b>1,71E-04</b>
São Paulo - Perus (A8)	TS 37	85,57	1201	<b>5,37E-05</b>	sim/0,20	653	<b>1,34E-04</b>

S.B.C = São Bernardo do Campo

O poço de monitoramento TS 29 pode ser utilizado como exemplo de caracterização da condutividade hidráulica de xistos alterados, através da realização de testes de *slug*. O poço apresentava a coluna de filtros parcialmente saturada e, durante o ensaio de retirada de tarugo, observou-se o efeito de drenança do pré-filtro. A variação inicial  $H_0$  correspondeu ao deslocamento de 48 cm, estimado anteriormente para o tarugo utilizado. A Figura 24 representa o teste de *slug* realizado no poço de monitoramento TS 29, analisado através do software *Winslug*®, utilizando-se o intervalo de 0,15 a 0,25 da carga normalizada ( $H/H_0$ ) para o método de Hvorslev.

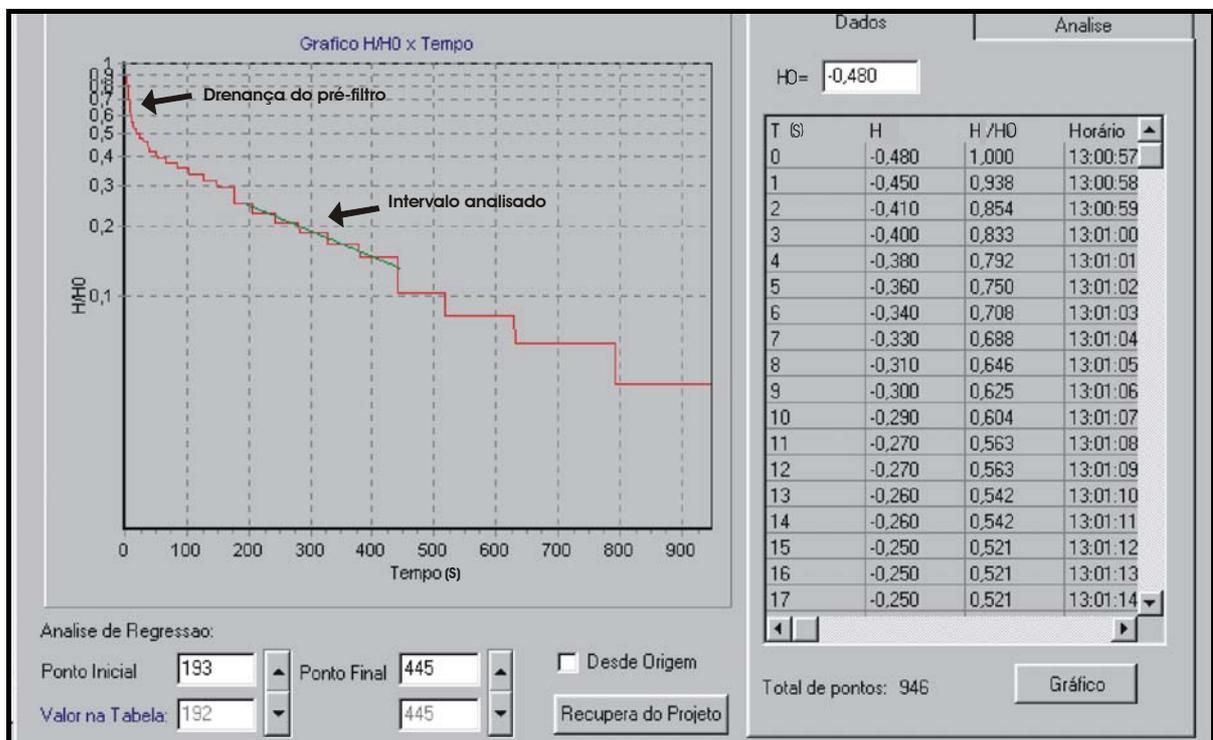


Figura 24 :Tela do software *Winslug*® mostrando gráfico do teste de *slug* realizado no poço de monitoramento TS 29. Os valores de tempo, carga hidráulica e carga hidráulica normalizada, mostrados à direita referem-se, à drenança do pré-filtro. O valor do deslocamento é em metros e o sinal negativo refere-se à descida do nível d’água quando da retirada do tarugo.

Parte dos poços de monitoramento, instalados nas áreas de domínio das rochas metassedimentares, apresentou a coluna de filtros totalmente saturada. Excetuando-se os poços multiníveis, o fenômeno de “afogamento” dos poços de monitoramento é bastante comum dada a baixa transmissividade dos aquíferos presentes.

Durante a realização de testes de *slug* em poços onde a coluna de filtros permaneceu totalmente saturada, o fluxo d'água foi controlado somente pelo aquífero. Os valores em escala logarítmica de  $H/H_0$  versus tempo formam uma reta (Figura 25). Em alguns poços, entretanto, no início dos ensaios, o nível d'água apresentou movimento oscilatório relacionado à grande coluna d'água presente. Para interpretação destes ensaios, este efeito foi minimizado utilizando-se os intervalos de análise propostos por Butler (1996). A Figura 25A mostra este fenômeno observado no início do ensaio de poço TS 22 (Figura 25B).

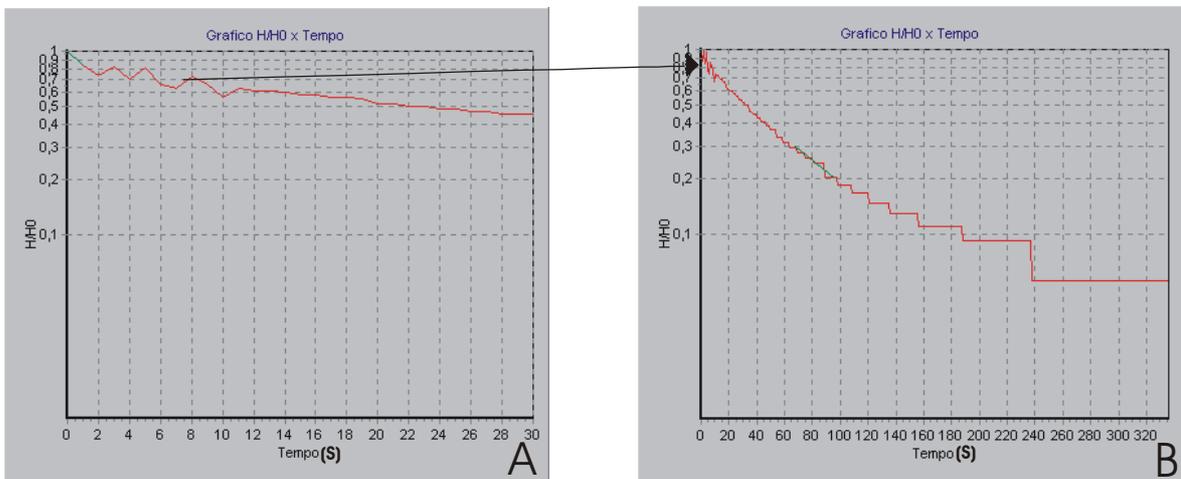


Figura 25

A: Movimento oscilatório do nível d'água, início do ensaio TS 22  
 B: Gráfico do teste de slug, poço TS 22.

Os valores de condutividade hidráulica das rochas metassedimentares alteradas apresentados na Tabela 5 foram tratados através de análises estatísticas.

Os valores obtidos pelos métodos de Hvorslev (1951) e Bower & Rice (1976) foram analisados através de histogramas. Para facilitar a análise e a comparação dos gráficos, os dados de condutividade foram agrupados através de intervalos de classe.

A Figura 26 representa o histograma dos valores condutividade hidráulica, obtidos através do método de Hvorslev (1951). Observa-se que o gráfico apresenta as maiores freqüências para os valores de classe inferiores a  $5,00 \times 10^{-4}$  cm/s e superiores a  $5,00 \times 10^{-5}$  cm/s. Cerca de 95% dos valores observados foram menores que  $5,00 \times 10^{-4}$  cm/s.

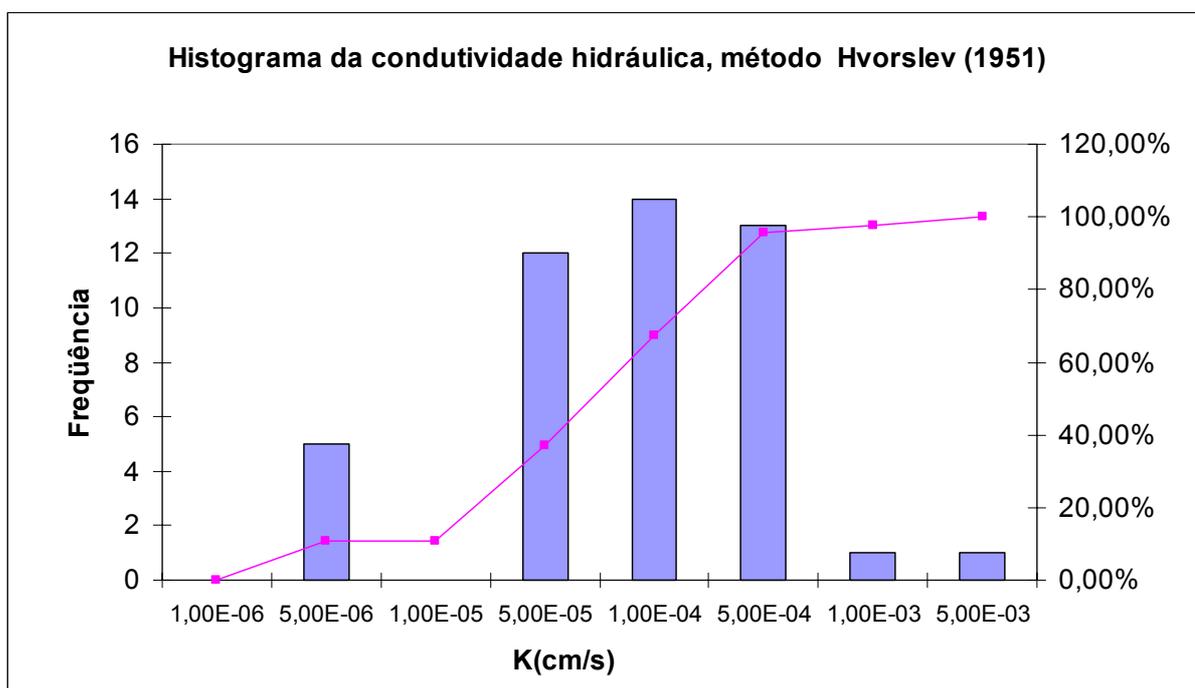


Figura 26: Histograma e frequência acumulada da condutividade hidráulica das rochas metassedimentares alteradas, segundo método de Hvorslev (1951).

A Figura 27 representa o histograma dos valores de condutividade hidráulica, obtidos através do método de Bower & Rice (1976). O gráfico mostra uma melhor distribuição dos valores de classe de condutividade que o gráfico anterior, mas as maiores frequências de valores de classe permaneceram entre  $5,00 \times 10^{-5}$  e  $5,00 \times 10^{-4}$  cm/s.

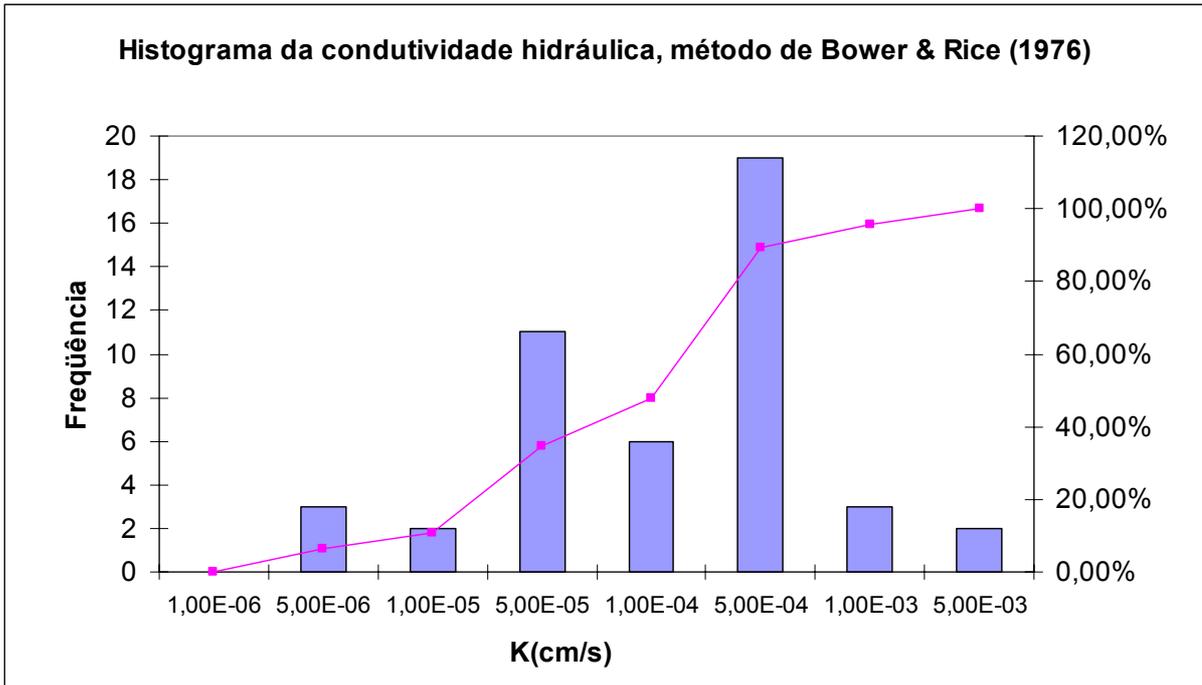


Figura 27 : Histograma e freqüência acumulada da condutividade hidráulica das rochas metassedimentares alteradas, segundo método de Bower & Rice (1976).

A análise estatística dos valores da Tabela 5 mostra que as rochas metassedimentares alteradas apresentam, segundo o método de Hvorslev (1951), condutividade hidráulica média (média geométrica) de  $5,01 \times 10^{-5}$  cm/s, valor mínimo de  $1,23 \times 10^{-6}$  cm/s e máximo de  $2,68 \times 10^{-3}$  cm/s.

Para o método de Bouwer & Rice (1976), a análise estatística dos dados mostrou média geométrica de  $7,99 \times 10^{-5}$  cm/s. Os valores máximos e mínimos foram respectivamente  $2,27 \times 10^{-3}$  cm/s e  $1,10 \times 10^{-6}$  cm/s.

Correlacionando-se os valores de condutividade hidráulica, obtidos através dos métodos de Bouwer & Rice e Hvorslev (Figura 28), observa-se uma excelente correlação de Pearson igual a 0,92.

Acredita-se que tal correlação esteja diretamente relacionada ao fato de que a grande maioria dos poços de monitoramento, durante os ensaios, não sofreu o efeito de drenança do pré-filtro. Para os poços que sofreram este fenômeno, a adoção dos intervalos de análise propostos por Butler (1996) mostrou-se eficaz na obtenção de valores de condutividade hidráulica semelhantes para os diferentes métodos.

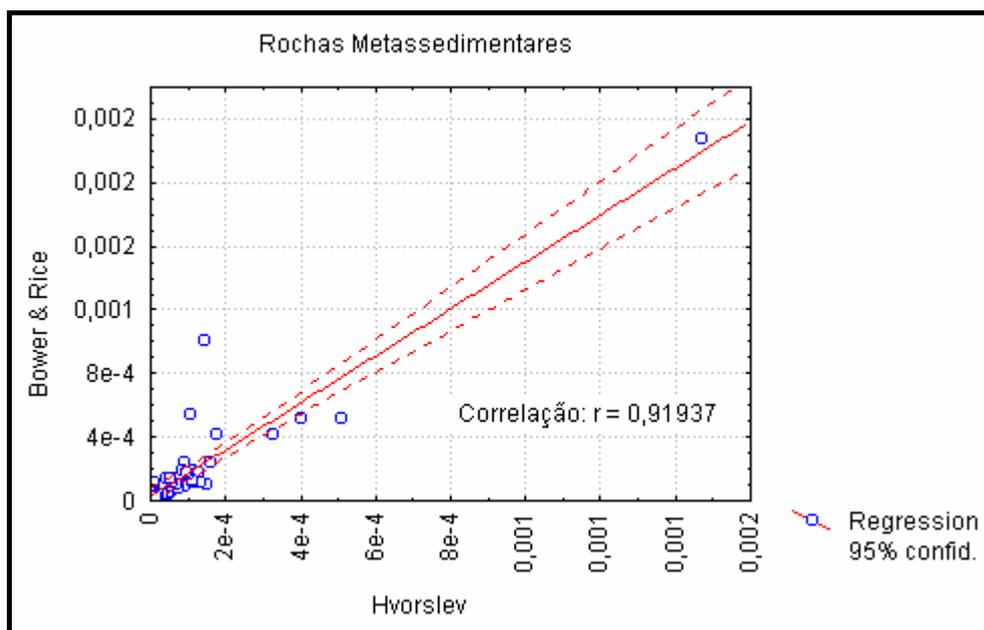


Figura 28: Gráfico de correlação dos valores de condutividade hidráulica obtidos através dos métodos de Bower & Rice e Hvorslev, para as rochas metassedimentares

## 6.2 - Condutividade Hidráulica das Rochas Granitóides e Gnáissicas Alteradas Saturadas.

As rochas granitóides e gnáissicas apresentam ampla distribuição geográfica na RMSP, principalmente nas porções leste e oeste. Por serem rochas resistentes aos processos de intemperismo, destacam-se no relevo na forma de matacões e blocos (Figura 29), dificultando, muitas vezes, a ocupação humana.

Para análise da condutividade hidráulica da porção alterada saturada das rochas granitóides e gnáissicas, contou-se com quatro áreas distribuídas na porção centro oeste da RMSP (Figura 22), nas quais foram ensaiados 17 poços de monitoramento. Embora o número de poços ensaiados seja pouco representativo para as dimensões da RMSP, reflete, proporcionalmente, a menor ocupação deste domínio pelas atividades industriais e comerciais, em relação ao domínio das rochas metassedimentares.

Quanto à classificação dos tipos litológicos presentes nas áreas avaliadas, optou-se por seguir a descrição dos perfis dos poços de monitoramento. Quando esta classificação não era possível, fez-se a observação de afloramentos nas proximidades das áreas avaliadas. Todas as áreas analisadas foram classificadas como áreas de gnaisses.

Para um controle litológico confiável na área B4 optou-se, durante a fase de investigação, pela amostragem contínua do solo de alteração. Na Figura 30A é possível observar uma amostra de gnaisse alterado (saprólito), coletada entre 18 e 18,5 m de profundidade. A foliação de alto ângulo é perpendicular ao plano da amostra. Observou-se também a presença de uma fratura subhorizontal de abertura milimétrica (Figura 30B), totalmente preenchida por óxidos de ferro.

A presença da fratura preenchida na profundidade de 18,5 m pode ser indicativa de que, na porção alterada do embasamento, tais estruturas provavelmente pouco influenciam o fluxo da água subterrânea no meio saturado. A amostra, embora mantivesse as estruturas originais da rocha, era bastante friável e o material desagregado era silto-arenoso.

Dos 17 poços de monitoramento instalados nas áreas de domínio das rochas granitóides e gnáissicas, 16 apresentaram a coluna de filtros parcialmente saturada.

Durante os testes de *slug*, estes poços apresentaram o fenômeno de drenança do pré-filtro.

Os parâmetros hidrogeológicos e construtivos dos poços de monitoramento estão presentes na Tabela 6. Os valores da condutividade hidráulica e os gráficos obtidos dos testes de *slug* estão presentes na Tabela 7 e Anexo I, respectivamente.



Figura 29: Afloramento área B3, com presença marcante de blocos e matações de gnaiss granítico.



Figura 30: Testemunho de gnaiss alterado recuperado no poço TS 54, área B4.

A - Amostra referente ao intervalo 18,0 e 18,5 m.

B - Detalhe da fratura subhorizontal preenchida.

Tabela 6: Parâmetros hidrogeológicos e construtivos dos poços de monitoramento instalados em áreas de rochas granitóides e gnaissicas alteradas.

Local	Poço	Litologia predominante	Método de Perfuração	Profundidade total (cm)	Nível d'água (NA) (cm)	Raio da perfuração (rw) (cm)	Raio do tubo (rc) (cm)	Posição do filtro (cm)	Comprimento efetivo do filtro (Le)(cm)	Distancia do NA à base do filtro (Lw) <sup>a</sup> (cm)	Porção analisada do aquífero (cm)
Taboão da Serra (B1)	TS 38	gnaisse	HSA	1000	452	10,40	2,54	400 a 1000	548	452	452 a 1000
Taboão da Serra (B1)	TS 39	gnaisse	HSA	1000	414	10,40	2,54	400 a 1000	586	414	414 a 1000
Taboão da Serra (B1)	TS 40	gnaisse	HSA	900	485	10,40	2,54	300 a 900	415	485	485 a 900
Taboão da Serra (B1)	TS 41	gnaisse	HSA	1000	258	10,40	2,54	400 a 1000	600	742	400 a 1000
Taboão da Serra (B1)	TS 42	gnaisse	HSA	1000	675	10,40	2,54	400 a 1000	325	325	675 a 1000
São Paulo - Ipiranga (B2)	TS 43	gnaisse	Trado manual	320	62	5,08	2,54	20 a 320	258	258	62 a 320
São Paulo - Ipiranga (B2)	TS 44	gnaisse	HSA	740	250	9,52	2,54	340 a 740	490	490	340 a 740
São Paulo - Ipiranga (B2)	TS 45	gnaisse	HSA	400	213	9,52	2,54	100 a 400	187	187	213 a 400
Cotia (B3)	TS 46	gnaisse	HSA	1450	1120	12,70	2,54	750 a 1450	330	330	1120 a 1450
Cotia (B3)	TS 47	gnaisse	Trado manual	800	598	5,08	2,54	450 a 850	202	202	598 a 850
Cotia (B3)	TS 48	gnaisse	HSA	450	302	12,70	2,54	150 a 450	148	148	302 a 450
Cotia (B3)	TS 49	gnaisse	HSA	800	396	12,70	2,54	300 a 800	404	404	396 a 800
Cotia (B3)	TS 50	gnaisse	HSA	800	282	12,70	2,54	200 a 800	518	518	282 a 800
São Paulo- Vila Sônia (B4)	TS 51	gnaisse	Trado manual	550	269	5,08	2,54	150 a 550	281	281	269 a 550
São Paulo- Vila Sônia (B4)	TS 52	gnaisse	Trado manual	1000	902	5,08	2,54	600 a 1000	98	98	902 a 1000
São Paulo- Vila Sônia (B4)	TS 53	gnaisse	Trado manual	500	167	5,08	2,54	100 a 500	333	333	167 a 500
São Paulo- Vila Sônia (B4)	TS 54	gnaisse	HSA	1850	1714	10,40	2,54	1450 a 1850	136	136	1714 a 1850

(Lw)<sup>a</sup> = h (espessura do aquífero)HSA = *Hollow stem auger*

Tabela 7: Valores de condutividade hidráulica obtidos de poços de monitoramento instalados em áreas de rochas granitóides e gnaíssicas alteradas.

Local	Poço	Le/rw	Método de Hvorslev		Método de Bower & Rice		
			To (s)	Condutividade hidráulica (cm/s)	Drenança do pré-filtro/porosidade	To (s)	Condutividade hidráulica (cm/s)
Taboão da Serra (B1)	TS 38	56,67	314	<b>7,42E-05</b>	sim/0,20	218	<b>4,85E-04</b>
Taboão da Serra (B1)	TS 39	60,60	145	<b>1,52E-04</b>	sim/0,20	78	<b>1,43E-03</b>
Taboão da Serra (B1)	TS 40	42,92	126	<b>2,27E-04</b>	sim/0,20	31	<b>3,77E-03</b>
Taboão da Serra (B1)	TS 41	62,05	974	<b>2,23E-05</b>	não	927	<b>2,10E-05</b>
Taboão da Serra (B1)	TS 42	33,61	19	<b>1,57E-03</b>	sim/0,20	16	<b>6,40E-03</b>
São Paulo - Ipiranga (B2)	TS 43	50,79	45	<b>1,09E-03</b>	sim/0,20	60	<b>1,29E-03</b>
São Paulo - Ipiranga (B2)	TS 44	51,47	275	<b>1,16E-04</b>	sim/0,20	258	<b>1,04E-04</b>
São Paulo -Ipiranga (B2)	TS 45	19,64	65	<b>8,54E-05</b>	sim/0,20	30	<b>1,70E-03</b>
Cotia (B3)	TS 46	25,98	0,79	<b>4,03E-02</b>	sim/0,20	0,79	<b>1,77E-02</b>
Cotia (B3)	TS 47	39,76	93	<b>6,31E-04</b>	sim/0,20	79	<b>9,64E-04</b>
Cotia (B3)	TS 48	11,65	148	<b>4,94E-04</b>	sim/0,20	46	<b>3,82E-03</b>
Cotia (B3)	TS 49	31,81	1,26	<b>2,20E-02</b>	sim/0,20	1,26	<b>9,62E-02</b>
Cotia (B3)	TS 50	40,78	1,06	<b>2,17E-02</b>	sim/0,20	1,06	<b>9,62E-02</b>
São Paulo- Vila Sônia (B4)	TS 51	55,31	28	<b>1,61E-03</b>	sim/0,20	15	<b>3,39E-03</b>
São Paulo- Vila Sônia (B4)	TS 52	19,29	88	<b>1,10E-03</b>	sim/0,20	61	<b>1,50E-03</b>
São Paulo- Vila Sônia (B4)	TS 53	65,55	26	<b>1,56E-03</b>	sim/0,20	19	<b>2,52E-03</b>
São Paulo- Vila Sônia (B4)	TS 54	13,07	126	<b>4,83E-04</b>	sim/0,20	69	<b>2,97E-03</b>

Embora o universo de ensaios seja limitado, os valores de condutividade hidráulica obtidos através da interpretação dos testes de *slug*, pelos métodos de Hvorslev (1951) e Bower & Rice (1976), foram representados em histogramas através de intervalos de classe.

A Figura 31 representa o histograma dos valores condutividade hidráulica obtidos através do método de Hvorslev (1951). Observa-se que o gráfico apresenta uma ampla distribuição dos valores de classe de condutividade hidráulica, evidenciando, provavelmente, o número reduzido de ensaios.

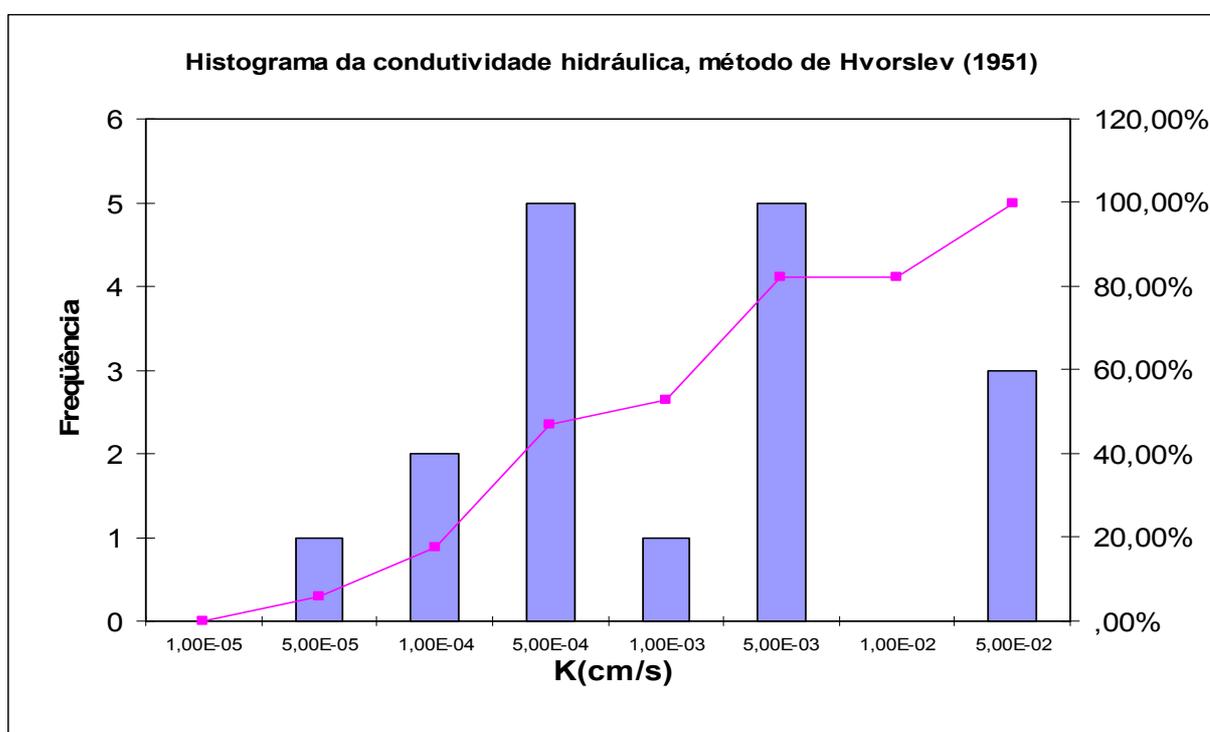


Figura 31: Histograma e freqüência acumulada de condutividade hidráulica das rochas granitóides e gnáissicas alteradas, segundo método de Hvorslev (1951).

A Figura 32 representa o histograma dos valores condutividade hidráulica obtidos através do método de Bower & Rice (1976). O gráfico mostra uma ampla distribuição dos valores de classe de condutividade, com maior concentração no intervalo situado entre  $1,00 \times 10^{-3}$  e  $5,00 \times 10^{-3}$  cm/s.

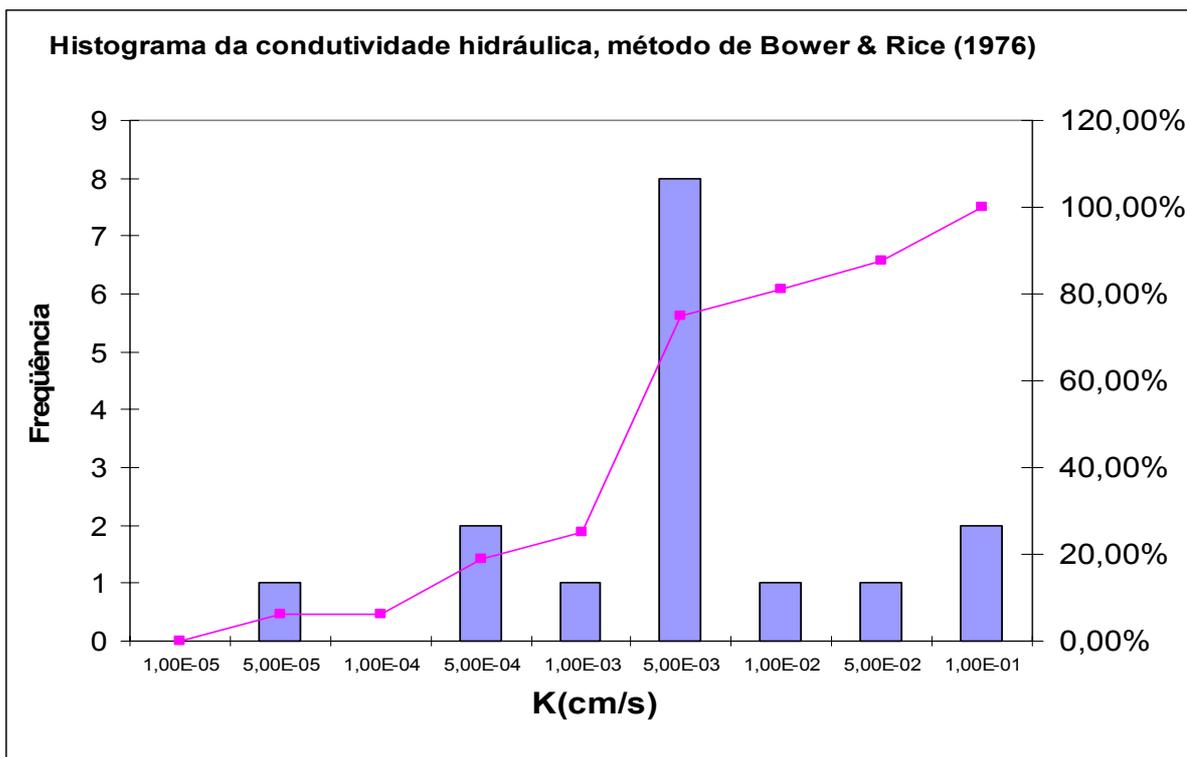


Figura 32: Histograma e freqüência acumulada de condutividade hidráulica das rochas granitóides e gnáissicas alteradas, segundo método de Bower & Rice (1976).

O estudo estatístico dos valores de condutividade hidráulica (Tabela 7), obtidos através dos ensaios realizados no conjunto de poços de monitoramento, instalados nas rochas granitóides e gnáissicas alteradas, revelou valores médios (média geométrica) de  $7,51 \times 10^{-4}$  cm/s para o método de Hvorslev e  $2,34 \times 10^{-3}$  cm/s para o método de Bouwer & Rice. Os valores máximos e mínimos foram, respectivamente,  $4,03 \times 10^{-2}$  cm/s e  $2,23 \times 10^{-5}$  cm/s para Hvorslev, e  $9,62 \times 10^{-2}$  cm/s e  $2,10 \times 10^{-5}$  cm/s para Bouwer & Rice.

Correlacionando-se os valores de condutividade hidráulica obtidos através dos métodos de Bouwer & Rice e Hvorslev (Figura 33), obtém-se um coeficiente de Pearson de 0,64.

A justificativa plausível para este valor de correlação menor, em relação às rochas metassedimentares alteradas, é que a quase totalidade dos poços sofreu o fenômeno de drenança do pré-filtro, influenciando a interpretação dos ensaios mesmo com a utilização dos intervalos propostos por Butler (1996). Cabe ressaltar o número limitado de ensaios e a influência das heterogeneidades do meio saturado.

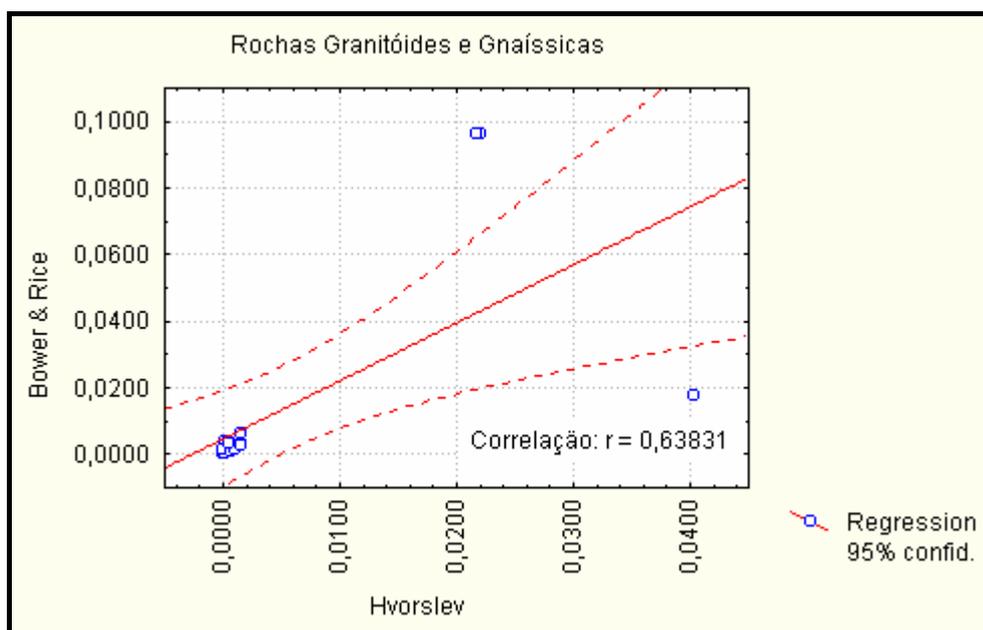


Figura 33: Gráfico de correlação dos valores de condutividade hidráulica obtidos através dos métodos de Bower & Rice e Hvorslev, para as rochas granitóides e gnaíssicas

### 6.3 - Análise Estatística do Conjunto Total de Dados

O conjunto total de dados referentes às características hidrogeológicas, construtivas e de valores de condutividade hidráulica, foi analisado através de uma matriz de correlação única (Tabela 8), permitindo, desta forma, comparar os índices de correlação entre as variáveis de cada domínio geológico.

As correlações, referentes aos domínios das rochas metassedimentares e granitóides, mostram excelentes relações de dependência do nível d'água com a profundidade final do poço, com índices de correlação de 0,88 e 0,90, respectivamente. Esta correlação reflete, provavelmente, o critério de perfuração dos poços de monitoramento, isto é, a perfuração é interrompida após atingir, grosso modo, 2 m de zona saturada.

A análise dos resultados mostra, em ambos domínios geológicos, valores baixos e negativos de correlação entre a profundidade média da coluna de filtro saturada e os valores de condutividade hidráulica obtidos pelos métodos de Hvorslev (1951) e Bower & Rice (1976). Estes fatos demonstram que os valores de condutividade hidráulica não se relacionam com a profundidade do meio alterado

saturado investigado, e sim com as heterogeneidades pontuais presentes no perfil de alteração de cada poço de monitoramento.

Esta situação mostra a necessidade de detalhamento quanto à influência no estudo da condutividade hidráulica dos seguintes fatores: inclinação da foliação, variação lateral do bandamento composicional, altitude (cota) do nível d’água, situação do relevo pré e pós-ocupação humana, pluviometria e evolução pedológica.

A análise de todos estes fatores, junto a um grande número de ensaios, permitirá, através das técnicas estatísticas multivariadas, o melhor entendimento do comportamento da condutividade hidráulica do embasamento cristalino alterado.

Tabela 8 : Tabela de coeficientes de correlação entre os parâmetros hidrogeológicos e construtivos dos poços de monitoramento. O valor superior de cada célula corresponde ao domínio das rochas metassedimentares e o inferior ao domínio das rochas granitóides e gnáissicas.

Variável	Nível d’água	Drenança préfiltro	Profundidade final do poço	Comprimento do filtro saturado Le	Profundidade média do filtro saturado	Raio do poço rw	Hvorslev	Bower & Rice
Nível d’água	<b>1,00</b>							
Drenança préfiltro	-0,07	<b>1,00</b>						
	0,15							
Profundidade final do poço	<b>0,88</b>	-0,29	<b>1,00</b>					
	<b>0,90</b>	-0,10						
Comprimento do filtro saturado Le	0,16	0,20	0,19	<b>1,00</b>				
	-0,38	-0,40	0,05					
Profundidade média do filtro saturado	<b>0,84</b>	-0,29	<b>0,95</b>	0,08	<b>1,00</b>			
	<b>0,90</b>	-0,01	<b>0,98</b>	-0,17				
Raio do poço rw	0,35	-0,50	0,56	-0,10	0,54	<b>1,00</b>		
	0,17	-0,10	0,36	0,38	0,27			
Hvorslev	-0,25	0,22	-0,25	-0,05	-0,25	-0,19	<b>1,00</b>	
	0,23	0,12	0,29	0,13	0,26	0,51		
Bower & Rice	0,26	0,32	-0,26	-0,02	-0,25	-0,14	<b>0,92</b>	<b>1,00</b>
	-0,09	0,12	0,01	0,25	-0,06	0,48	<b>0,64</b>	

Embora a análise de correlação mostre que os valores de condutividade hidráulica não se correlacionam com a profundidade do meio saturado, procurou-se, através do uso de histogramas, mostrar a distribuição dos valores de condutividade hidráulica em função da profundidade saturada média para o conjunto de poços de monitoramento.

As análises foram arbitrariamente subdivididas em dois conjuntos: profundidades menores que 1000 cm e profundidades maiores que 1000 cm (Figuras 34 e 35).

Analisando os histogramas, observa-se claramente que os ensaios realizados nos poços, cujos filtros encontram-se mais rasos, apresentam classes de condutividade hidráulica com valores situados entre  $1,00 \times 10^{-3}$  e  $5,00 \times 10^{-3}$  cm/s (Figura 34), ausentes nos ensaios do conjunto situado a maiores profundidades que 1000 cm (Figura 35).

Desta forma, conclui-se que níveis mais rasos do embasamento alterado, apesar das heterogeneidades inerentes, tendem a fornecer valores de condutividade hidráulica mais elevados. Isto se deve possivelmente à maior alteração química nestas porções mais rasas.

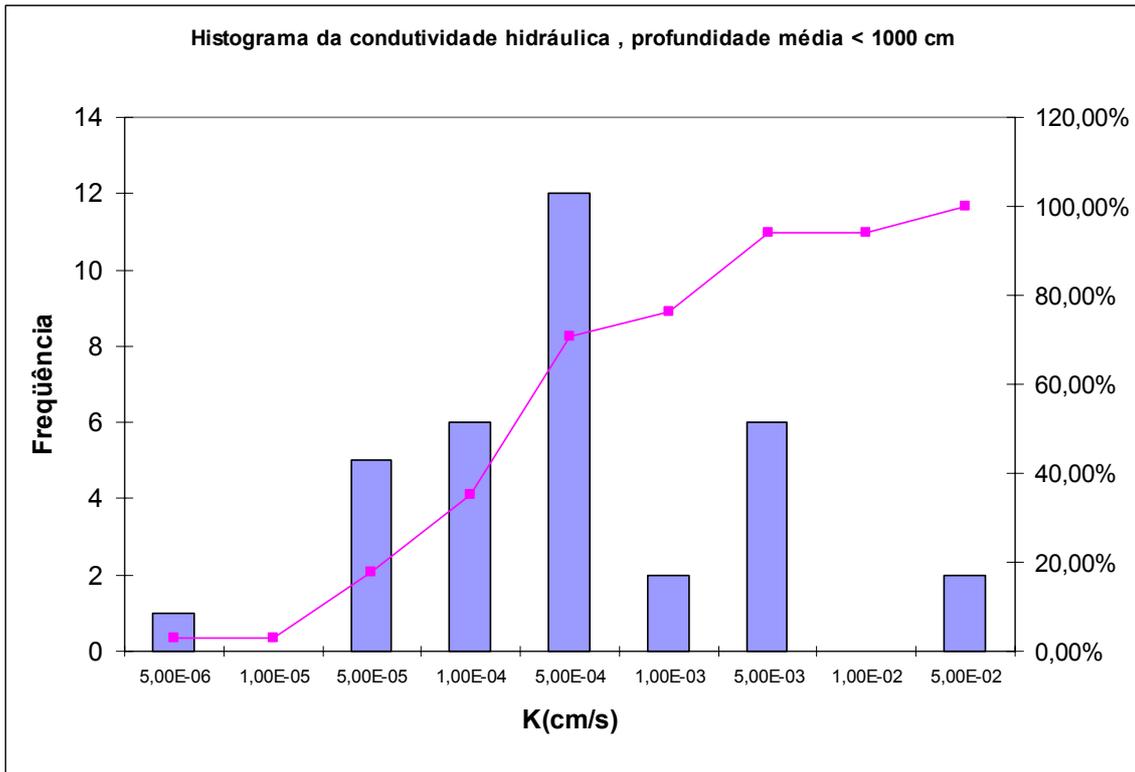


Figura 34: Histograma e freqüência acumulada da condutividade hidráulica (Hvorslev) para o conjunto de poços de monitoramento, com valor médio de profundidade de filtro saturado menor que 1000 cm.

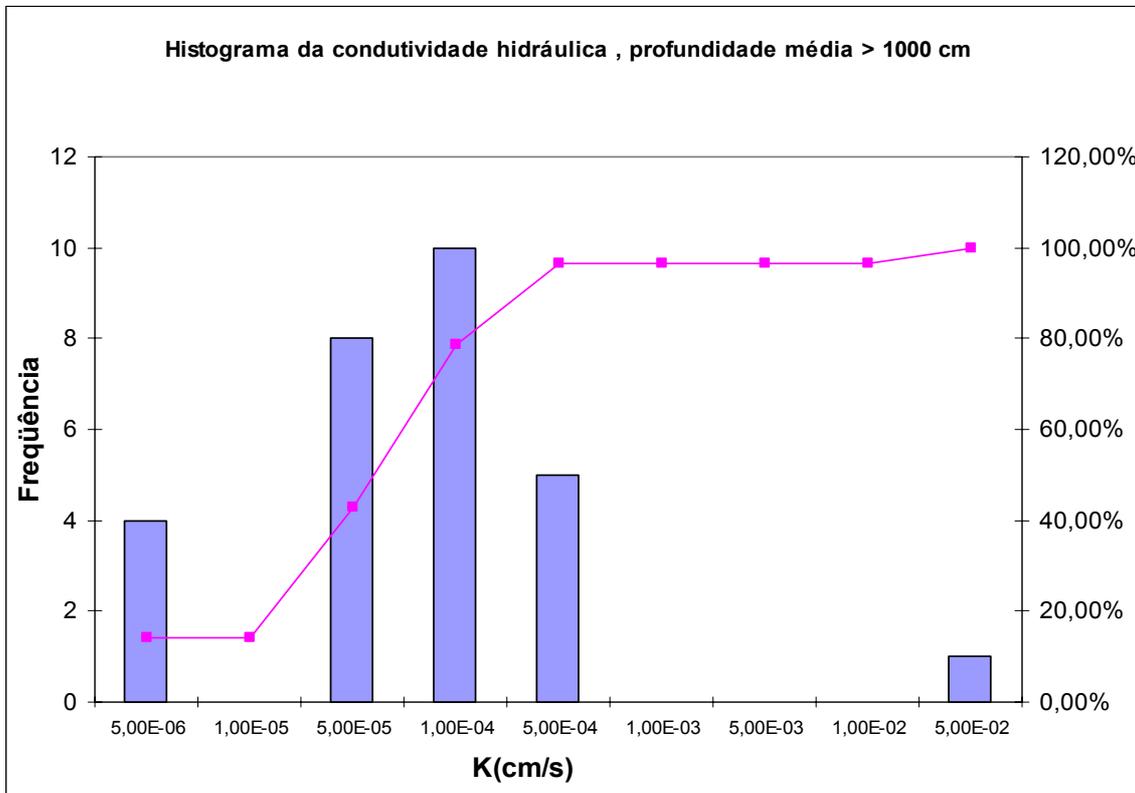


Figura 35: Histograma e freqüência acumulada da condutividade hidráulica (Hvorslev) para o conjunto de poços de monitoramento, com valor médio de profundidade do filtro saturado maior que 1000 cm.

## 7 – CONCLUSÕES

Os aquíferos presentes no embasamento cristalino alterado saturado, na Região Metropolitana de São Paulo, são caracterizados por dois grandes domínios hidrogeológicos. O primeiro está relacionado às rochas metassedimentares, com predominância de xistos, e o segundo relativo às rochas granitóides e gnáissicas.

A caracterização da condutividade hidráulica do embasamento cristalino alterado saturado, através da realização de testes de *slug* em 63 poços de monitoramento, constitui estudo pioneiro, com significativa contribuição para o conhecimento de suas propriedades hidráulicas.

O uso de transdutor de pressão, em conjunto com o *software* Winslug®, permitiu a realização dos testes de *slug* de forma precisa, principalmente nos poços de monitoramento que apresentaram o fenômeno de drenança do pré-filtro.

Durante análise dos testes de *slug*, a adoção de intervalos de carga hidráulica normalizada, proposto por Butler (1996) para os métodos de Hvorslev (1951) e Bouwer & Rice (1976), mostrou-se adequada, principalmente para os poços que sofreram o fenômeno de drenança do pré-filtro.

Os resultados dos testes revelaram que a condutividade hidráulica média das rochas granitóides alteradas é de  $7,51 \times 10^{-4}$  cm/s, segundo o método de Hvorslev (1951), e  $2,34 \times 10^{-3}$  cm/s para o método de Bouwer & Rice (1976). Para as rochas metassedimentares alteradas foram obtidos valores médios de  $5,01 \times 10^{-5}$  cm/s e  $7,99 \times 10^{-5}$  cm/s, respectivamente. Os maiores valores de condutividade hidráulica das rochas granitóides e gnáissicas alteradas refletem a predominância das porções silto-arenosas.

A análise dos valores de condutividade hidráulica dos dois domínios hidrogeológicos, através de análise multivariada, mostra que não há correlação estatisticamente significativa com a profundidade do meio alterado saturado.

No entanto, analisando a distribuição dos valores de condutividade hidráulica, nota-se tendência de ligeira predominância de valores mais elevados em níveis mais rasos.

Analisando-se os dados apresentados, conclui-se que os mesmos constituem um número bastante reduzido para as dimensões do embasamento alterado da RMSP. Este fato deveu-se, principalmente, à dificuldade em se obter novas áreas

junto às empresas de consultoria ambiental, que tratam a questão da avaliação hidrogeológica e ambiental com absoluto sigilo.

Desta forma, somente um maior número de ensaios, em conjunto com o melhor conhecimento das heterogeneidades de cada área avaliada, permitirá o melhor entendimento das características hidrogeológicas do embasamento cristalino alterado.

A maior popularização dos testes de *slug* está diretamente relacionada ao grau de exigência dos órgãos ambientais na caracterização hidrogeológica de áreas potencialmente contaminadas. Espera-se que os testes de *slug* sejam cada vez mais aplicados de forma objetiva e exaustiva, permitindo-se assim um maior número de dados e que os mesmos possam estar disponíveis a toda comunidade envolvida no estudo dos aquíferos presentes no embasamento cristalino alterado da RMSP.

## 8 – Referências Bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS -. **Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem – NBR 13895**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 21 p.
- ALMEIDA, F.F.M. **Fundamentos geológicos do relevo paulista**. Boletim do Instituto Geológico e Geográfico, v.41, p. 167-262, 1964.
- BOUWER, H.; RICE, R. C. **A Slug Test Method for Determining Hydraulic Conductivity of Unconfined Aquifers with Completely or Partially Penetrating Wells**. Water Resources Research, v.12, n.3, p. 423-428, 1976.
- BOUWER H. **The Bouwer and Rice Slug Test - an Update**. *Ground Water*, v. 27, n. 3, p. 304-309, 1989.
- BUTLER, J.J. Jr. **Slug tests in site characterization: Some practical considerations**. Environ. Geosci., v. 3, n.3, p. 154- 161, 1996.
- BUTLER, J.J. Jr. **Design, Performance and Analysis of Slug Tests**. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1997. 252 p.
- BUTLER, J.J. Jr.; MCWEEL, C.D.; LIU, W. **Improving the quality of parameter estimates obtained from slug tests**. *Ground Water*, v. 34, n. 3, p. 480-490, 1996.
- BUTLER, J.J. Jr.; Healey J.M. **Relationship between pumping-test and slug- test parameters: Scale effect or artifact?** *Ground Water*, v. 36 n. 2, p. 305-313, 1998.
- CAVALCANTE, I.N. **Estudo Hidrogeológico de Terreno Cristalino com Manto de Intemperismo – Área Piloto de Atibaia (SP)**. 1990. 123 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- CHANG. H.K.; CARNIER NETO, D. **Winslug – Programa de aquisição e tratamento automatizado de testes de slug**. Unesp-Fundunesp 2000. Registro INPI # 000332760.
- COUTINHO, J.M.V. **Carta geológica da região metropolitana da Grande São Paulo**. São Paulo: EMPLASA, 1980. 2 folhas. Escala 1:100.000.

- COOPER, H.H.; BREDEHOEFT, J.D.; PAPADOPOLUS I.S. **Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water.** Water Resources Research, v.3, n. 1, p. 263-269, 1967.
- DEPARTAMENTO DE AGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Estudo de Águas Subterrâneas, Região Administrativa 1 – Grande São Paulo.** São Paulo: DAEE, 1975. 3 v.
- FERNANDES, A.J. **As unidades regionais do Complexo Embu e seu embasamento no leste do Estado de São Paulo.** 1991. 120p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology.** New Jersey: Prentice Hall, 2001. 598p.
- FREEZY, R.A. & CHERRY, J.A. **Groundwater.** New Jersey: Prentice Hall, 1979. 604 p.
- HASSUDA, S. **Crítérios para a gestão de áreas suspeitas ou contaminadas por resíduos sólidos estudo de caso na Região Metropolitana de São Paulo.** 1997. 142p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- HASUI, Y.; FONSECA, M.J.G.; RAMALHO, R. **A parte central da Região de Dobramentos Sudeste e o Maciço Mediano de Guaxupé.** In: SCHOBENHAUS, C. GEOLOGIA DO BRASIL. Brasília: DNPM, 1984. p. 307-328.
- HASUI, Y.; SADOWSKI, G.R. **Evolução geológica do pré-cambriano na região do Estado de São Paulo.** Revista Brasileira de Geociências, v.6, n.3, p.182-200, 1976
- HASUI, Y. ; CARNEIRO, C.D.R. ; BISTRICH, C.A. **Os granitos e granitóides da Região de Dobramento do Sudeste no Estado de São Paulo.** CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978 , Recife. *Anais...Recife*: SBG, 1978. v 6, p. 2594-2608.
- HIRATA, R. C. A.; NUNES DA SILVA, A. **Mapa hidrogeológico da Bacia do Alto Tietê.** In: Macedo, A. (coord). *Banco de Dados Espaciais da Bacia do Alto Tietê.* LIG-IGc-USP, São Paulo, 1999. Disponível em:

< [http://geolig.iqc.usp.br/alto\\_tietê.htm](http://geolig.iqc.usp.br/alto_tietê.htm)>. Acesso em: 10 ago. 2003.

- 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, São Paulo, v. 31, n.1, p. 43-50, 2001.
- HVORSLEV, H.J. **Time Lag and Soil Permeability in Groundwater Observations**. U.S. Army. Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Bulletin n. 36, 1951.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, Pró Minério/Promocet: 1981a. 126p + 1 mapa. Escala 1:500.000.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, Pró Minério/Promocet: 1981b. 94p + 1 mapa. Escala 1:500.000.
- JULIANI, C. **O embasamento Pré- Cambriano da Bacia de São Paulo**. In: Seminário Problemas Geológicos e Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo. 1992, São Paulo. São Paulo: ABAS, ABGE, SBG/SP, 1992. Atas, p. 03-20.
- JULIANI, C.; BELJAVSKIS, P.; SCHORSCHER, H.D. **Petrogenese do vulcanismo e aspectos metalogenéticos associados: Grupo Serra do Itaberaba na Região do São Roque SP**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34., 1986. Goiânia. Anais... Goiânia, SBG, 1986. v.2, p. 730-743.
- MELO, M.S.; CAETANO, S.L.V.; COIMBRA, A.M. **Tectônica e sedimentação na área das bacias de São Paulo e Taubaté**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34., 1986. Goiânia. Anais... Goiânia, SBG, 1986. v. 1. p. 321-336.
- MCGUIRE, V.; ZLOTINIK V.A. **Characterizing vertical distribution of horizontal hydraulic conductivity in an unconfined sand and gravel aquifer using double packer slug tests**. Ground Water, v. 33, n. 5, p. 850, 1995.
- OLIVEIRA, E. **Contaminação de aquíferos por Hidrocarbonetos provenientes de vazamentos de tanques de armazenamento subterrâneo**. 1992, 112 p. Dissertação (Mestrado) - Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

- PALMER, C.D.; PAUL, D.G. **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. 1987
- REBOUÇAS, A. **Condições de Uso e Proteção das Águas Subterrâneas**. In: Seminário Problemas Geológicos e Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo. 1992, São Paulo. São Paulo: ABAS, ABGE, SBG/SP, 1992. Atas, p. 77-88.
- RICCOMINI, C. **O Rift continental do sudeste do Brasil**. 1989. 256 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- RICCOMINI, C.; COIMBRA, A. M. Geologia da Bacia Sedimentar de São Paulo. In NEGRO Jr, A.; FERREIRA, A.A.; ALONSO, U.R.; LUZ, P.A.C. **Solos da Cidade de São Paulo**. São Paulo: ABMS/ABEF. 1992. p. 37-94.
- RICCOMINI, C.; COIMBRA, A. M.; TAKIYA, H. (1992). **Tectônica e Sedimentação na Bacia de São Paulo**. In: Seminário Problemas Geológicos e Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo. 1992, São Paulo. São Paulo: ABAS, ABGE, SBG/SP, 1992. Atas, p. 21-45.
- ROCHA, G. A.; GONÇALVES, V. G.; REBOUÇAS, A.; Barreto, L. M. B. **Hidrogeologia da Bacia de São Paulo**. In: IGc/USP e SBG/SP, Workshop Geologia da Bacia de São Paulo. São Paulo, 1989. Atas, p.44–49.
- RODRIGUEZ. S. K. **GEOLOGIA URBANA DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO**. 1998. 171p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SABESP/CEPAS/IGc-USP. **Diagnóstico Hidrogeológico da Região Metropolitana de São Paulo**. Diagnóstico Final. Convênio SABESP/CEPAS-IG/USP. São Paulo. 1994. 115 p.
- SALLES, F.A.F. **Avaliação de área contaminada por compostos orgânicos às margens da represa de Guarapiranga, no município de São Paulo**.1999. 107 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SANDERS L. L. **Manual of Field Hydrogeology**. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 381 p.
- SHEPHERD, R. G. **Correlations of permeability and grain size**. Ground Water, v. 27 n. 5, p. 633-38, 1988.

STATSOFT, INC. STATISTICA for Windows. Tulsa; Statsoft Inc., 1995.

TASSINARI, C.C.G; KAWASHITA, K.; SCHUMSS, R.V.; TAYLOR, P.N. **As idades das rochas e dos eventos metamórficos da região sudeste do Estado de São Paulo.** *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA* , 35. Belém, 1988. Anais... Belém, SBG, 1988. v.6, p. 2840-2853.

TAYLOR, R.G. **Weathered rock aquifers: vital but poorly developed.** *Waterlines*, v. 20, n. 2, p. 3-6, 2001.

TAYLOR, R.G.; TINDIMUGAYA, C. **The role of groundwater in the Victoria Nile Basin of Uganda: implications of a catchment water balance.** *In: Comprehensive Water Resources Development of the Nile Basin: Action Plan, Proceedings of the IVth Nile 2002 Conference*, Kampala (Uganda), section A, p. 87 -94, 1996

TAYLOR, R.G.; HOWARD, K.W.F. **Groundwater recharge in the Victoria Nile basin of east Africa: support for the soil-moisture balance approach using stable isotope tracers and flow modelling.** *Journal of Hydrology* , v. 180, p 31-53, 1996.

TAYLOR, R.G.; HOWARD, K.W.F.. **A tectono-geomorphic model of the hydrogeology of deeply weathered crystalline rock: evidence from Uganda.** *Hydrogeology Journal* , v. 8, p. 279-294, 2000.

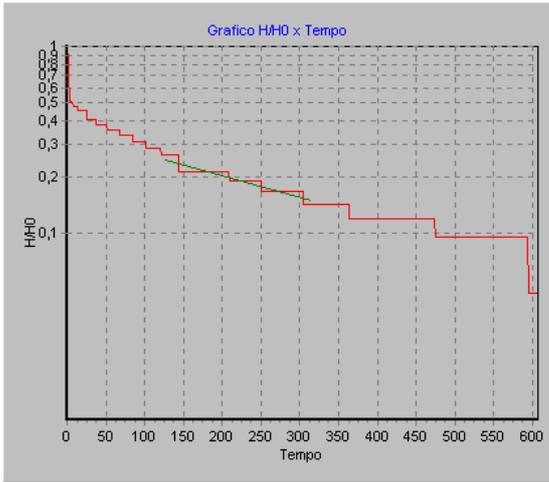
THIEM, G. **Hydrologische methoden.** Leipzig: Gebhardt, 1906. 56 p.

TINDIMUGAYA, C. **Regolith importance in groundwater development.** *IN: Conference Sustainability of water and sanitation systems, 21st WED Conference Kampala, Uganda*, p. 252-254, 1995.

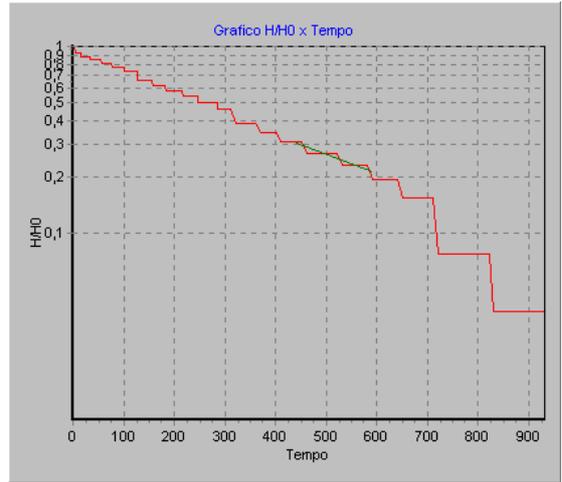
VAN DER KAMP, G. **Determining aquifer transmissivity by means of well response tests: The underdamped case.** *Water Resources Research*, v.12, n. 1, p. 71-90. 1976.

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

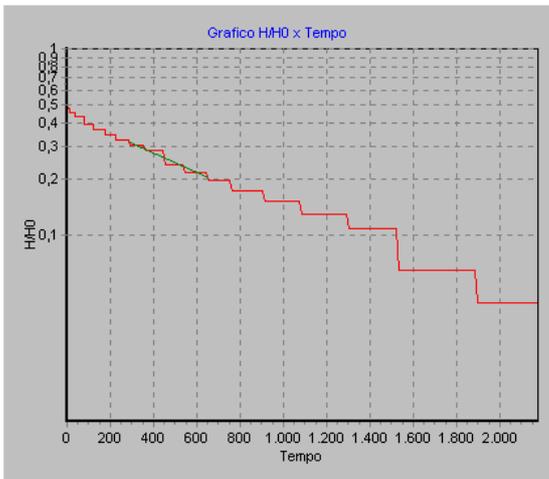
# Anexo 1



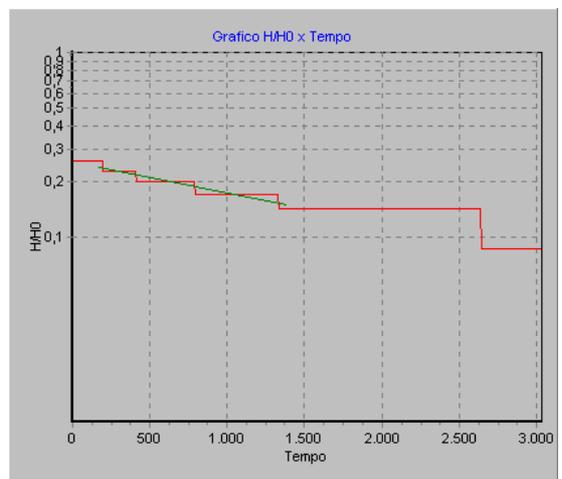
TS 01 (método Hvorslev, tempo em segundos)



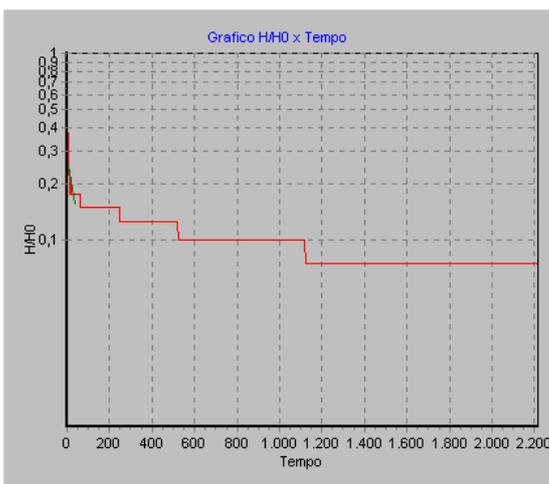
TS 02 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



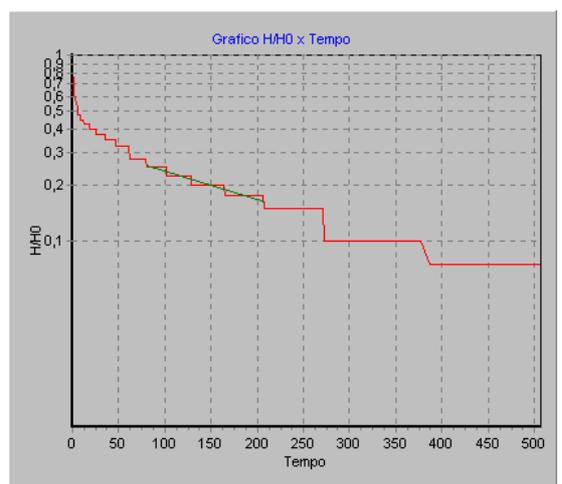
TS 03 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



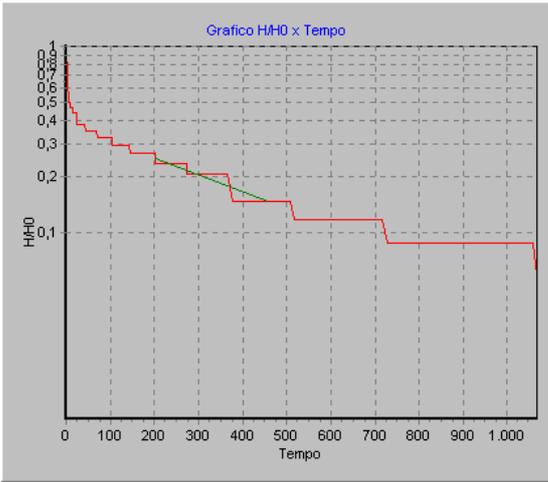
TS 04 (método Hvorslev, tempo em segundos)



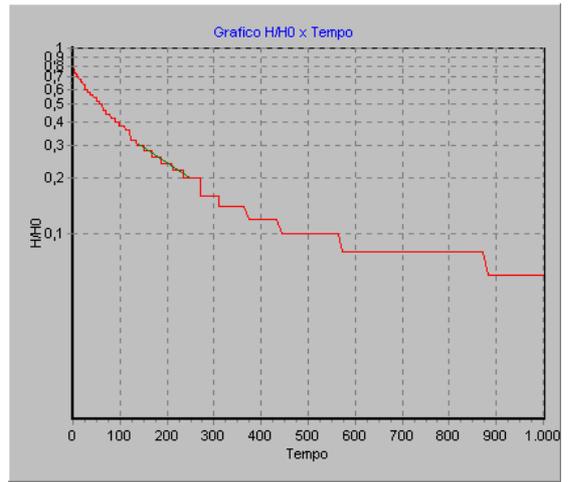
TS 05 (método Hvorslev, tempo em segundos)



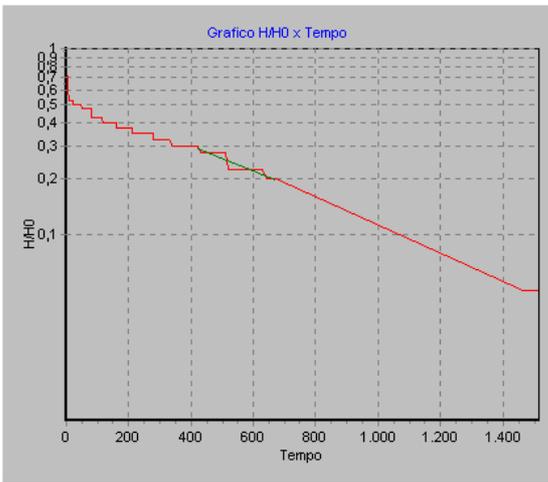
TS 06 (método Hvorslev, tempo em segundos)



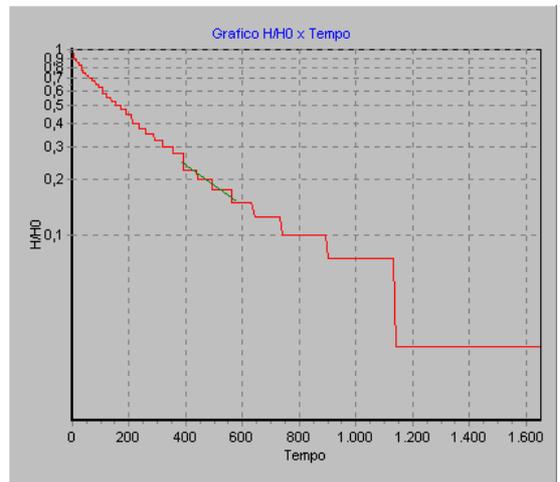
TS 07 (método Hvorslev, tempo em segundos)



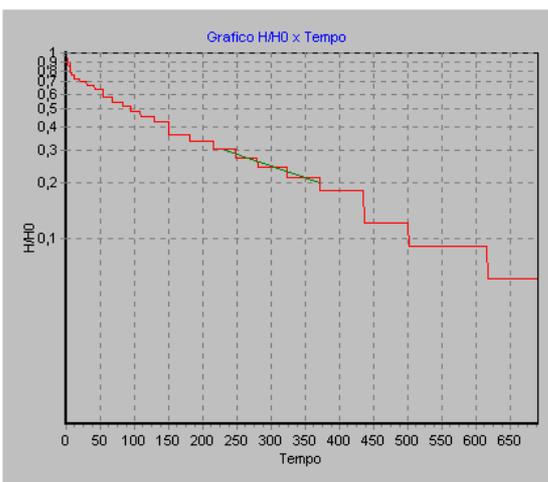
TS 08 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



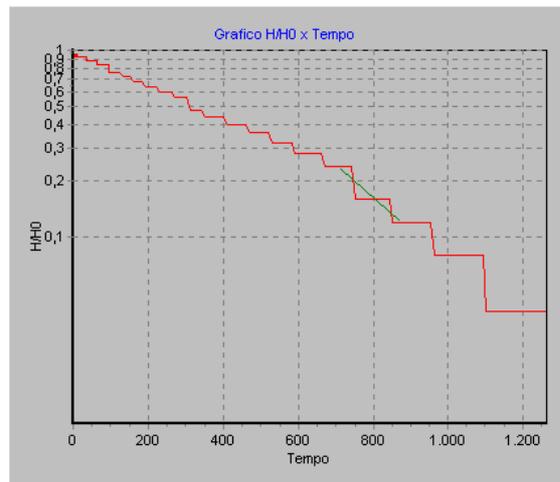
TS 09 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



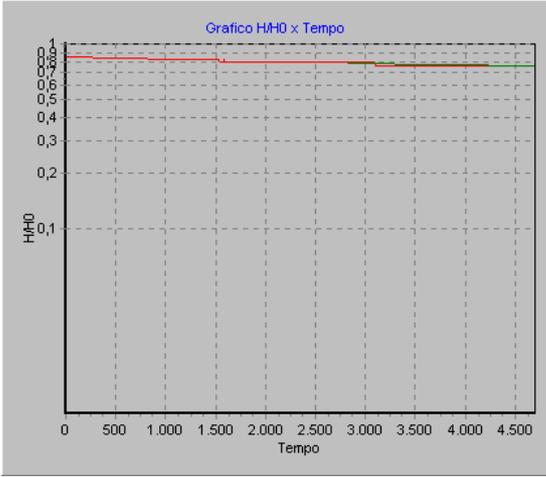
TS 10 (método Hvorslev, tempo em segundos)



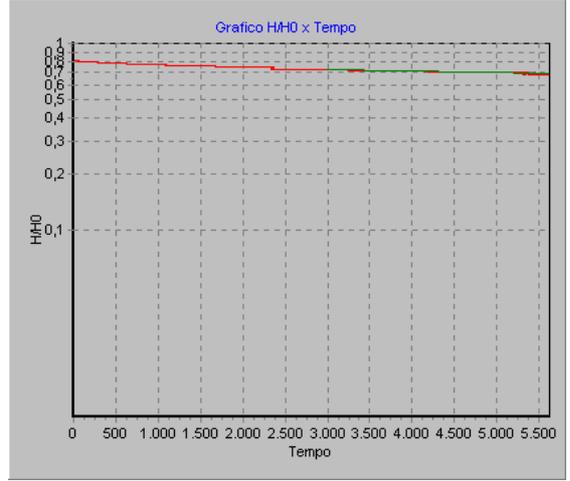
TS 11 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



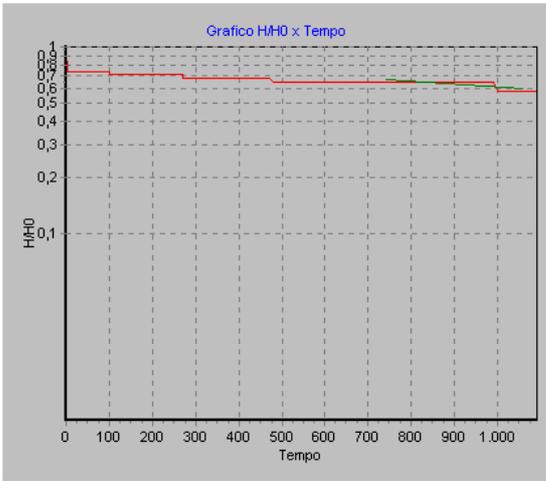
TS MN12A (método Hvorslev, tempo em segundos)



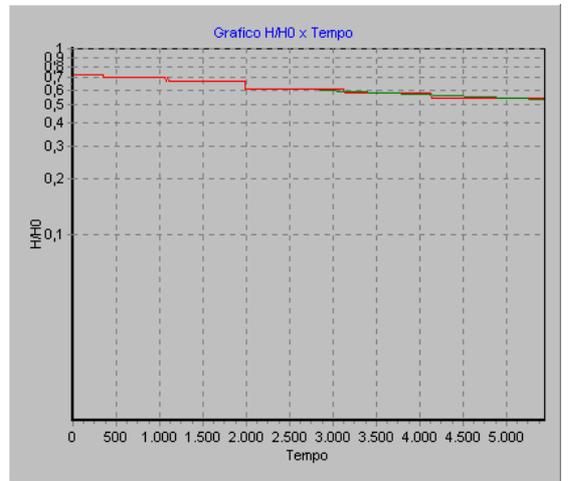
TS MN12B (tempo em segundos)



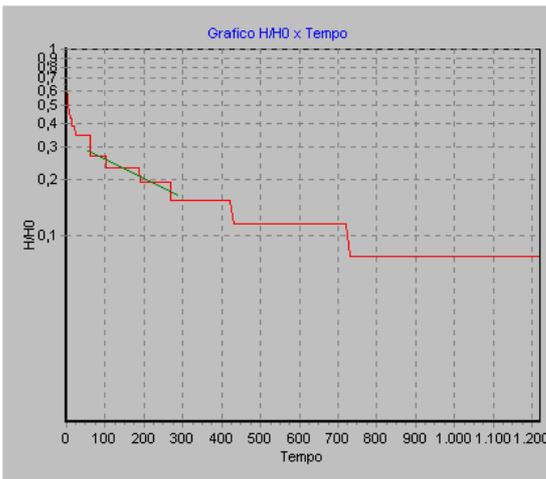
TS MN12C (tempo em segundos)



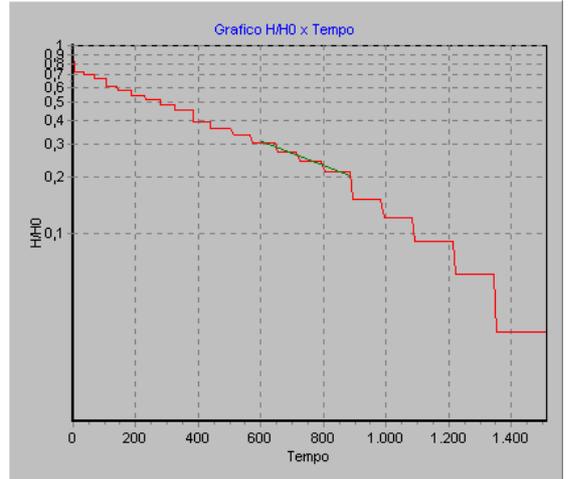
TS MN13B (tempo em segundos)



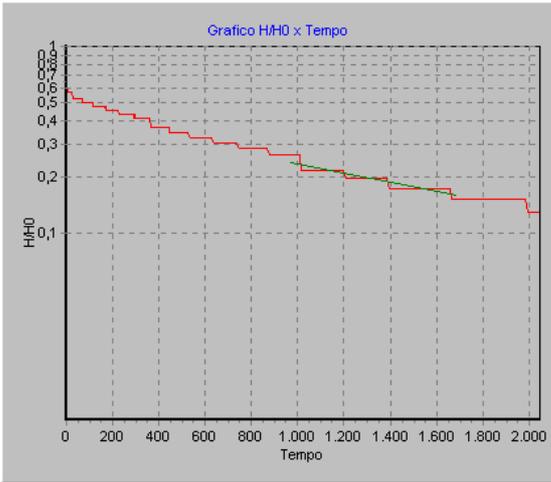
TS MN13C (tempo em segundos)



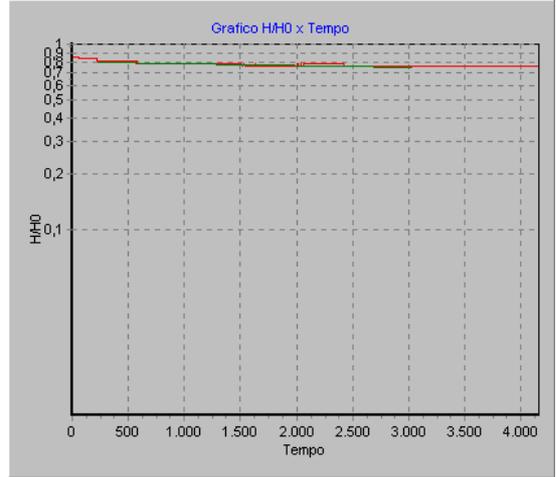
TS MN14A (método Hvorslev, tempo em segundos)



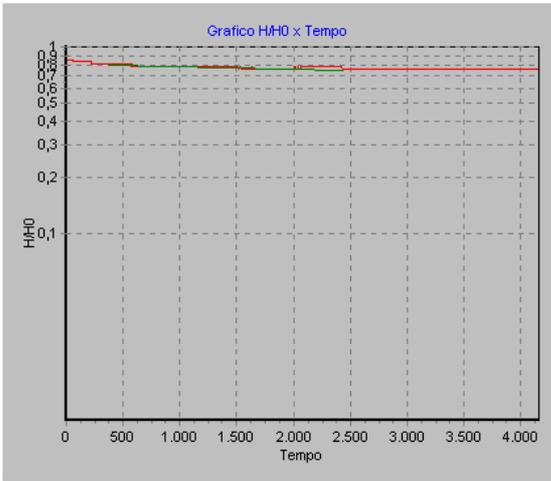
TS MN 14B (método Bower & Rice, tempo em segundos)



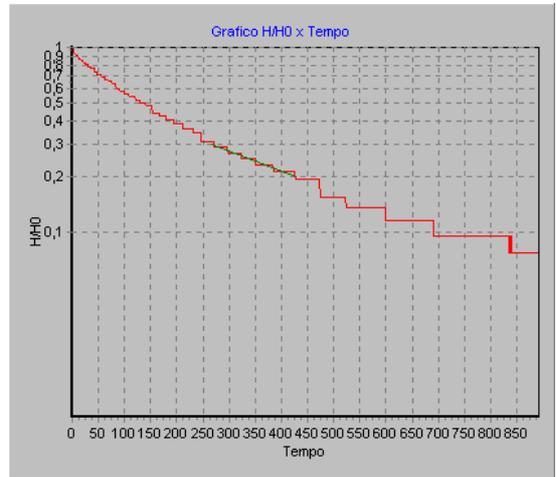
TS MN14C (método Hvorslev, tempo em segundos)



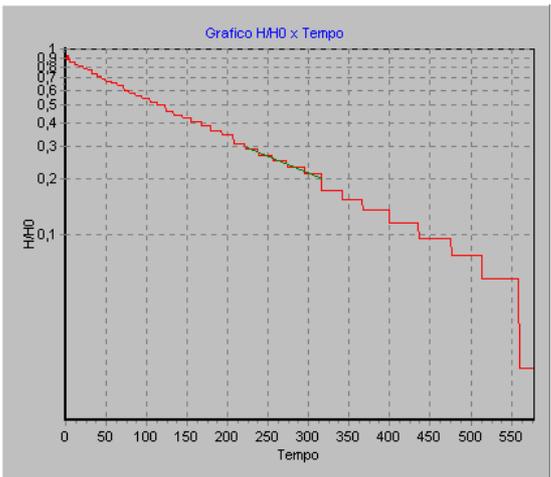
TS MN15R (tempo em segundos)



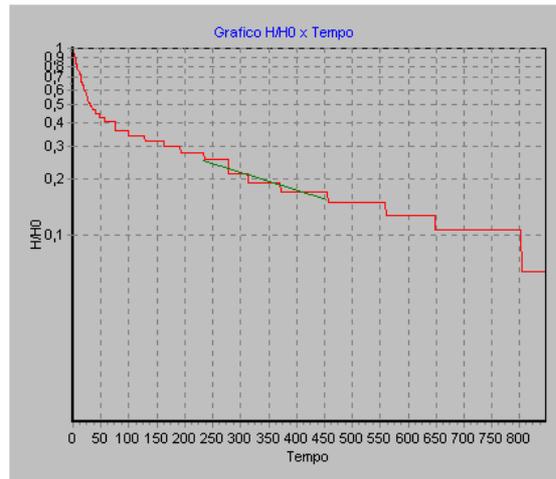
TS MN15P (tempo em segundos)



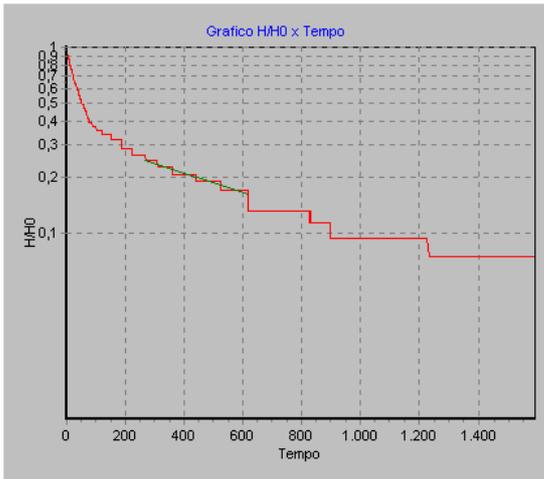
TS MN16R (método Bower & Rice, tempo em segundos)



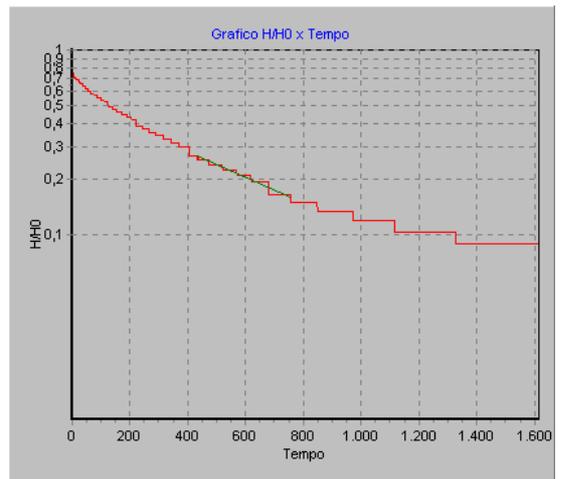
TS MN16P (método Bower & Rice, tempo em segundos)



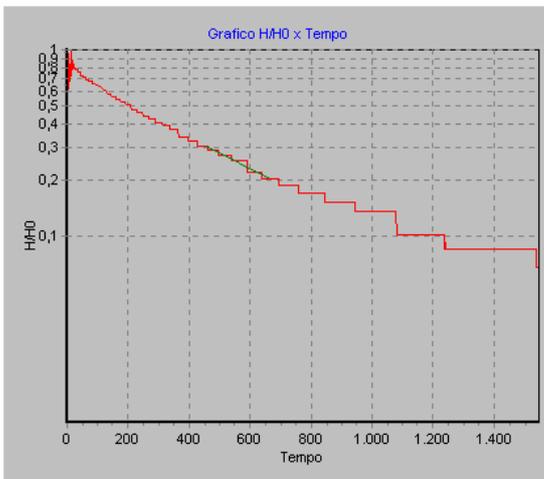
TS MN17R (método Hvorslev, tempo em segundos)



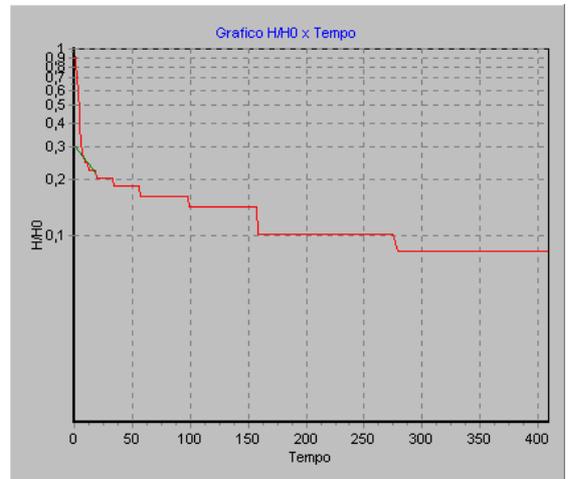
TS MN 17P (método Hvorslev, tempo em segundos)



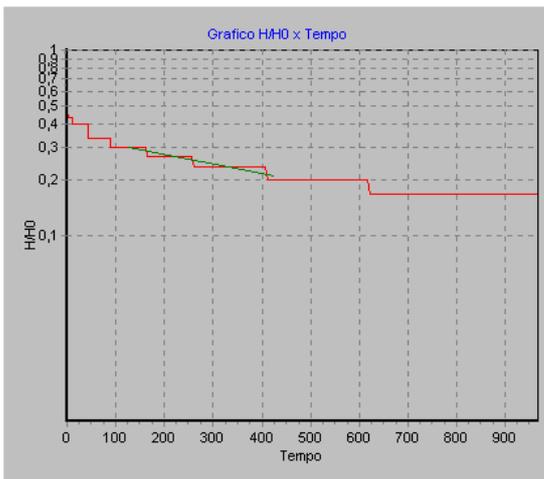
TS MN 18R (método Hvorslev, tempo em segundos)



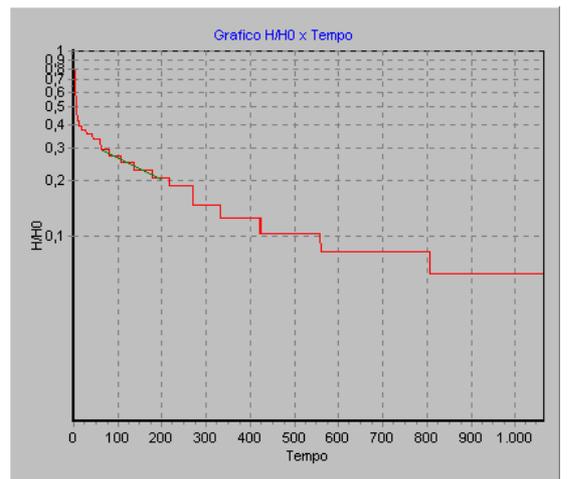
TS MN 18P (método Bower & Rice, tempo em segundos)



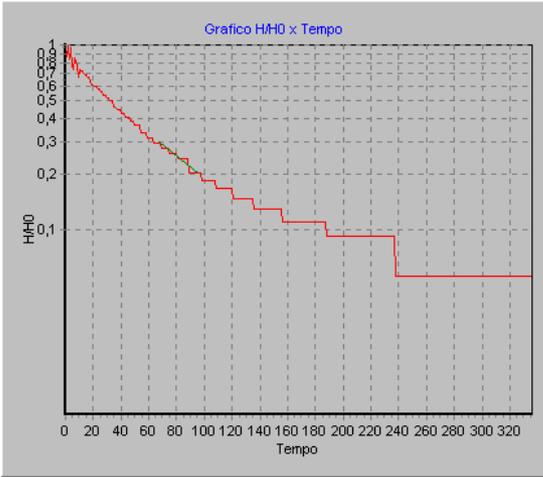
TS 19 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



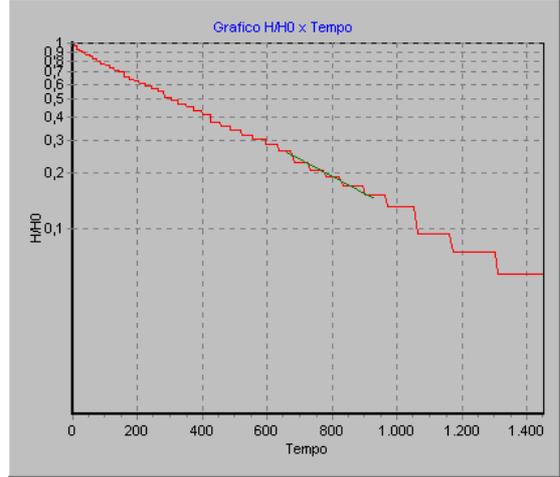
TS 20 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



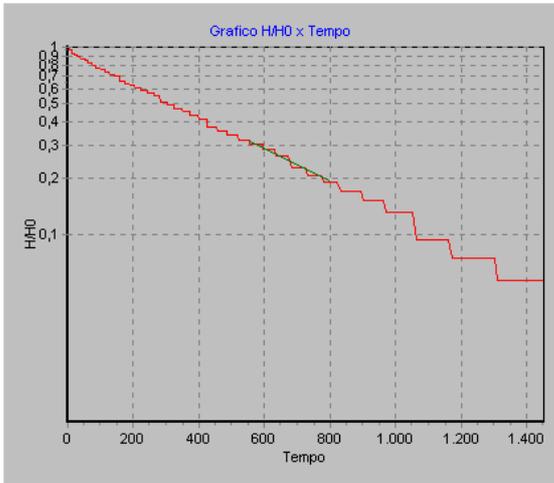
TS 21 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



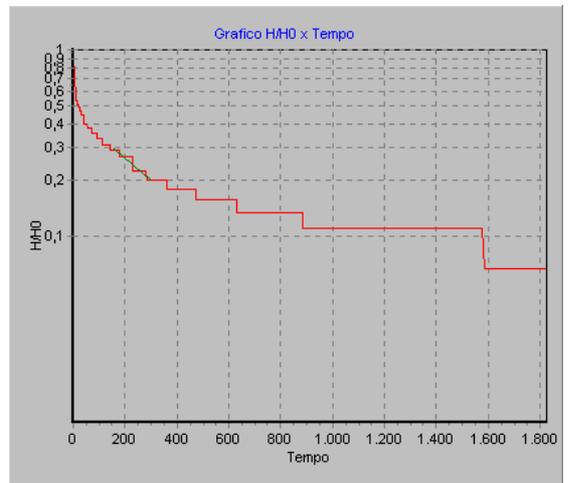
TS 22 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



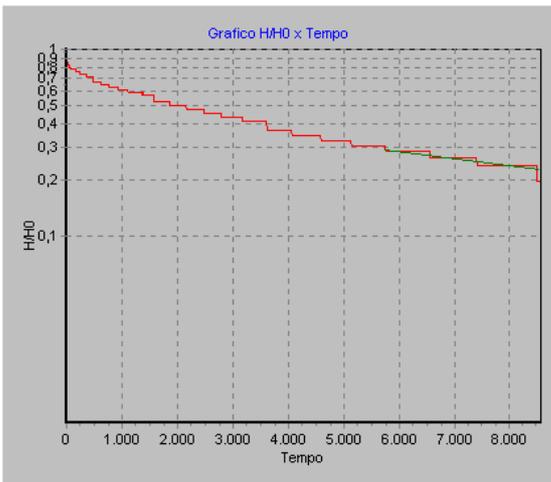
TS 23 (método Hvorslev, tempo em segundos)



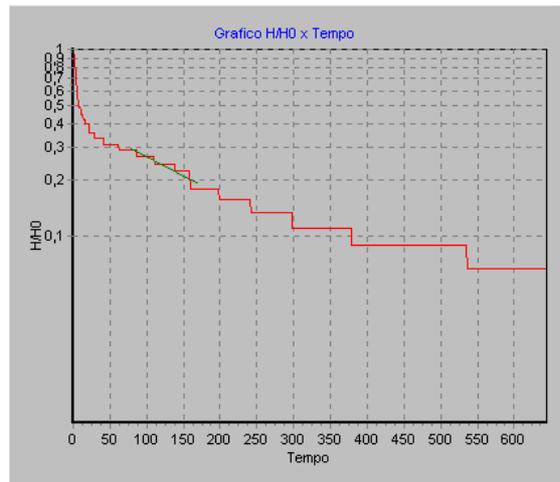
TS 24 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



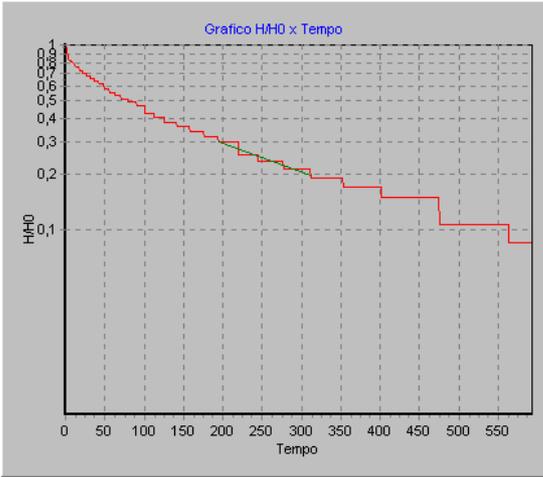
TS 25 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



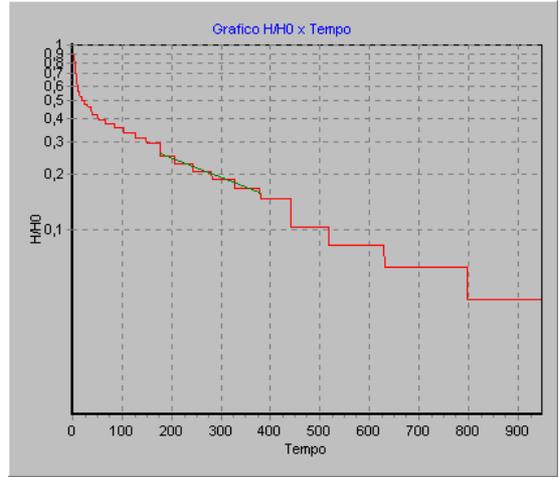
TS 26 (tempo em segundos)



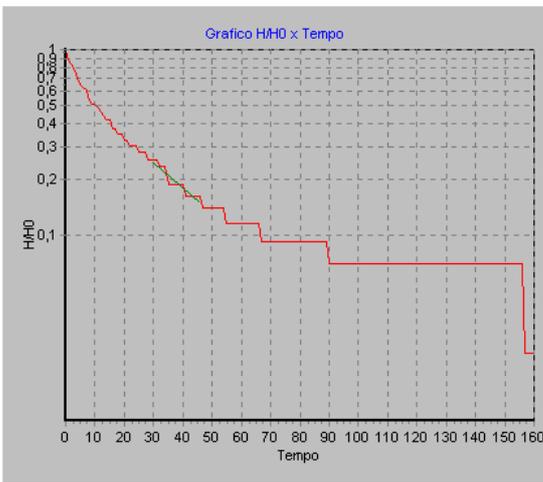
TS 27 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



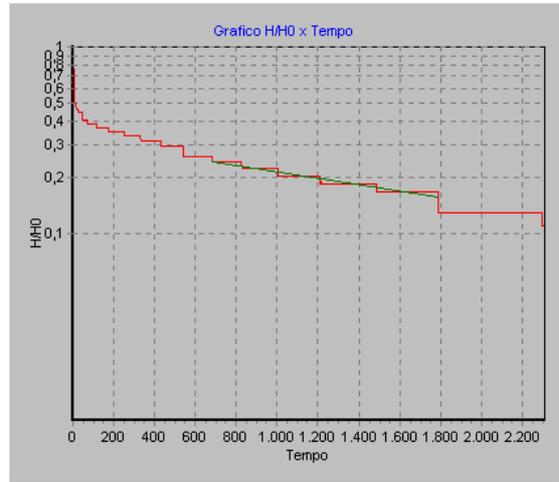
TS 28 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



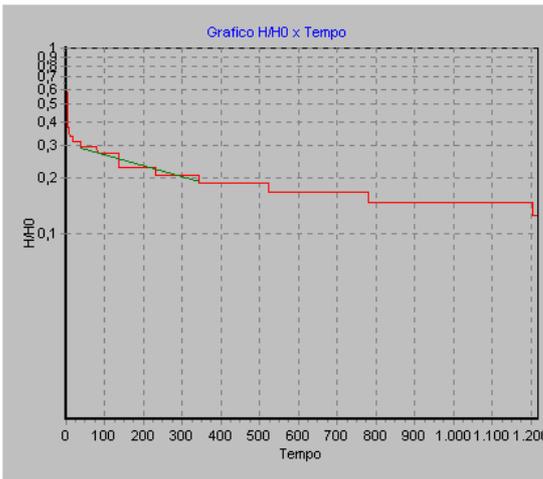
TS 29 (método Hvorslev, tempo em segundos)



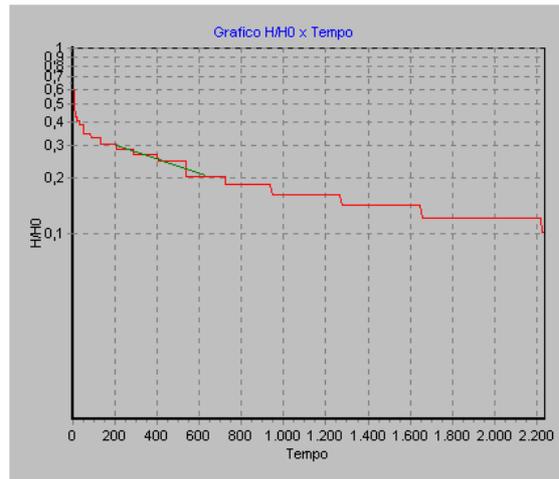
TS 30 (método Hvorslev, tempo em segundos)



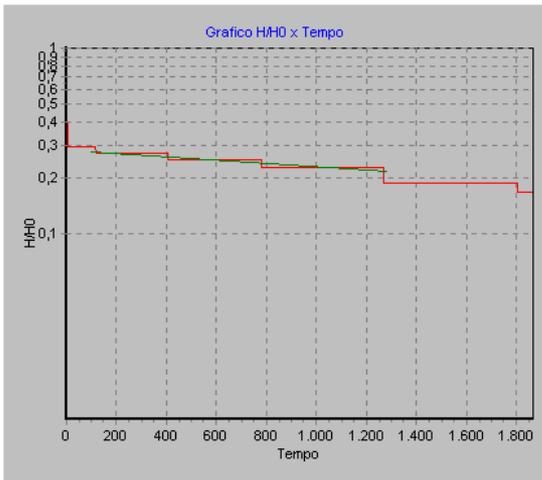
TS 31 (método Hvorslev, tempo em segundos)



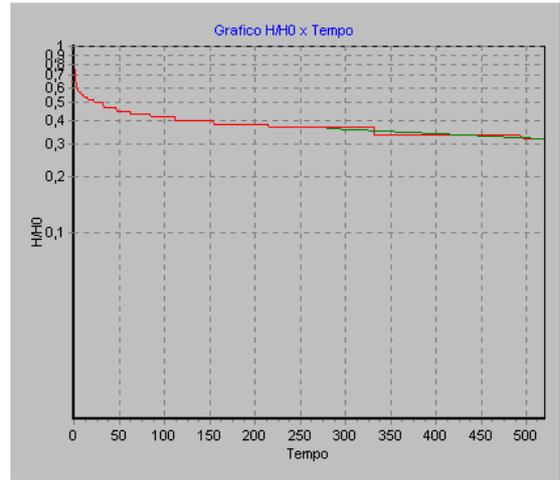
TS 32 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



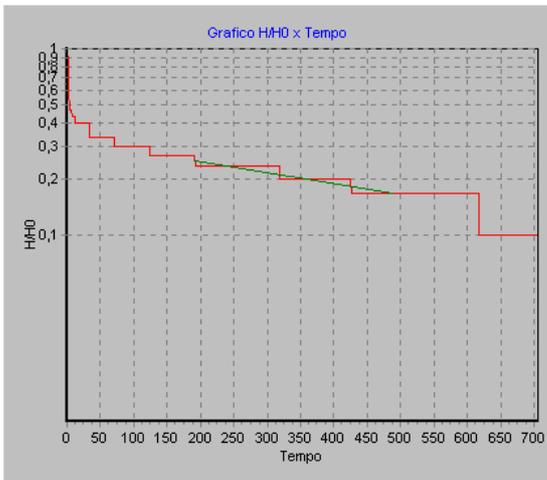
TS 33 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



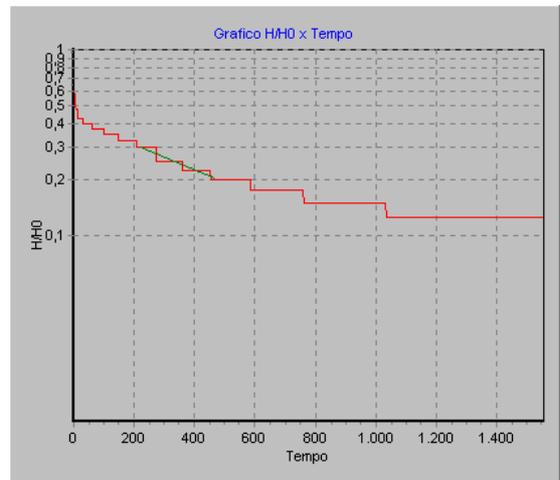
TS 34 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



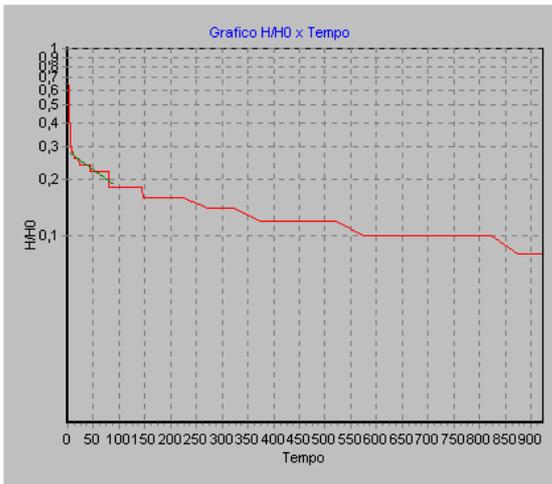
TS 35 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



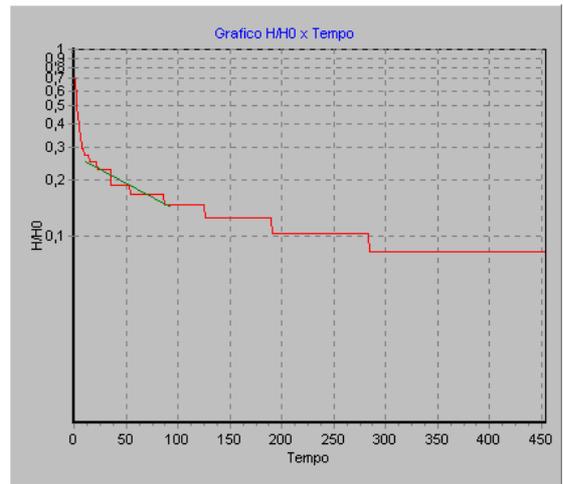
TS 36 (método Hvorslev, tempo em segundos)



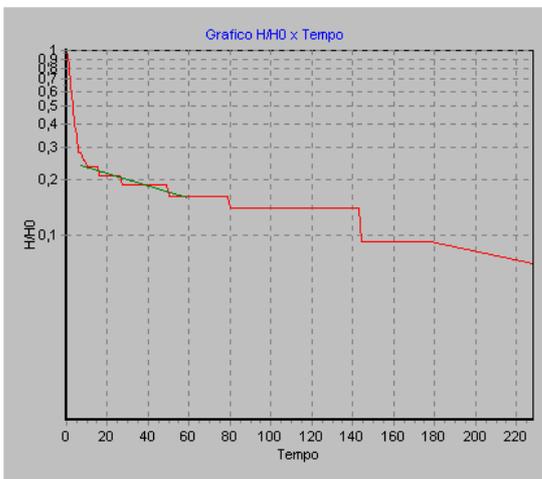
TS 37 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



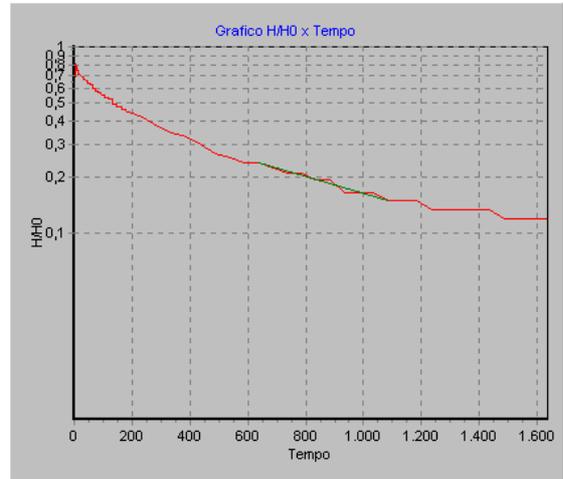
TS 38 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



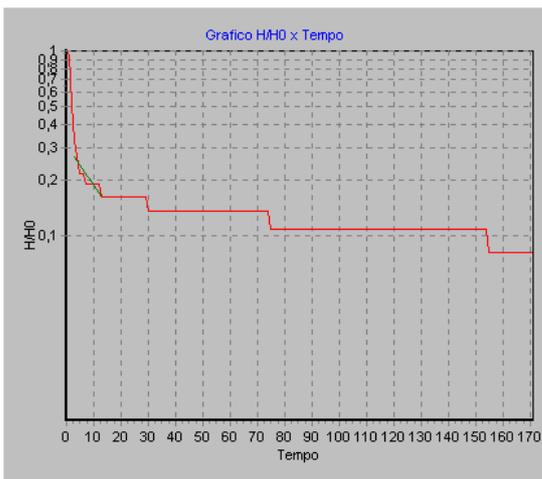
TS 39 (método Hvorslev, tempo em segundos)



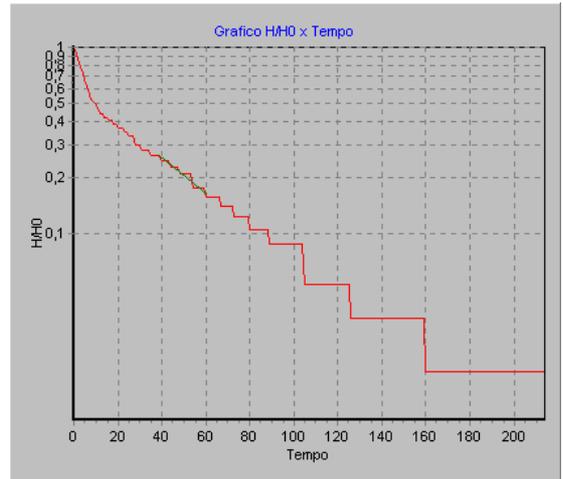
TS 40 (método Hvorslev, tempo em segundos)



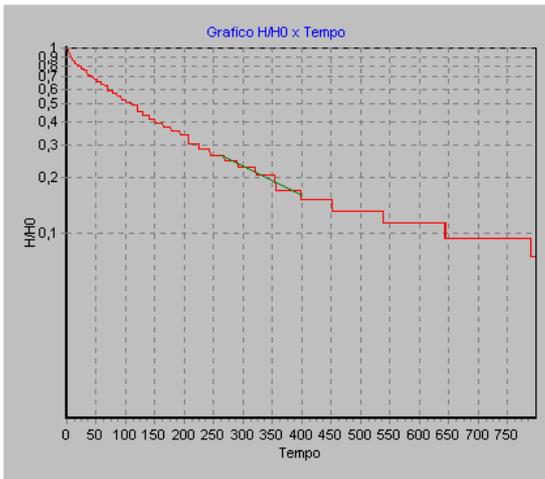
TS 41 (método Hvorslev, tempo em segundos)



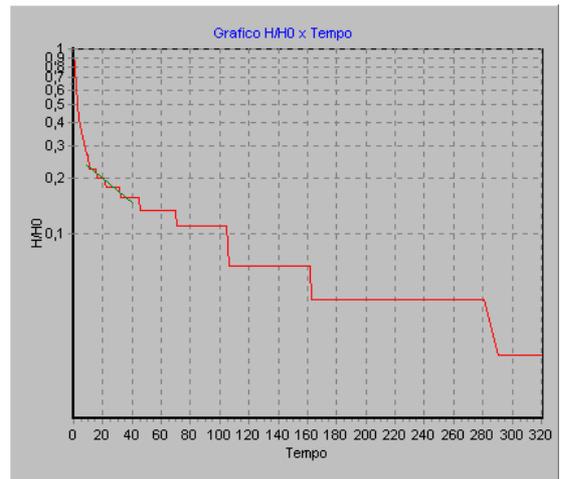
TS 42 (método Hvorslev, tempo em segundos)



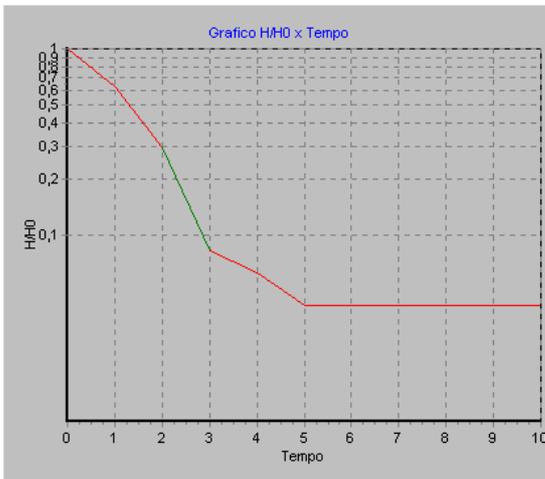
TS 43 (método Hvorslev, tempo em segundos)



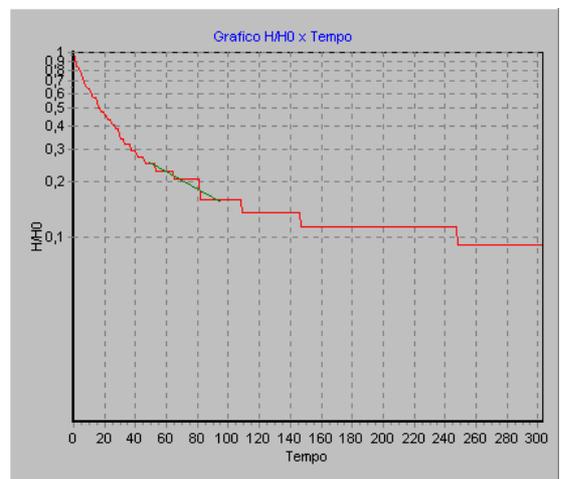
TS 44 (método Hvorslev, tempo em segundos)



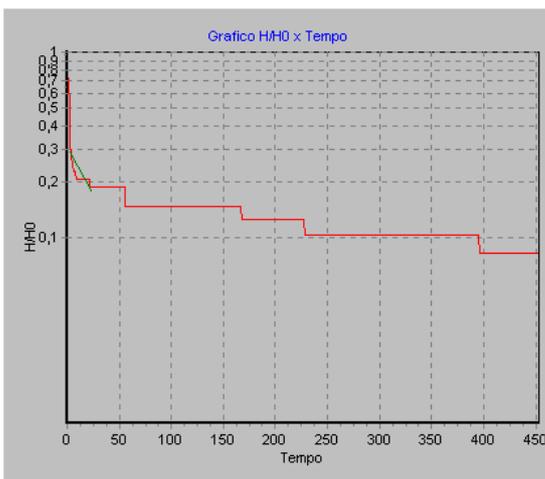
TS 45 (método Hvorslev, tempo em segundos)



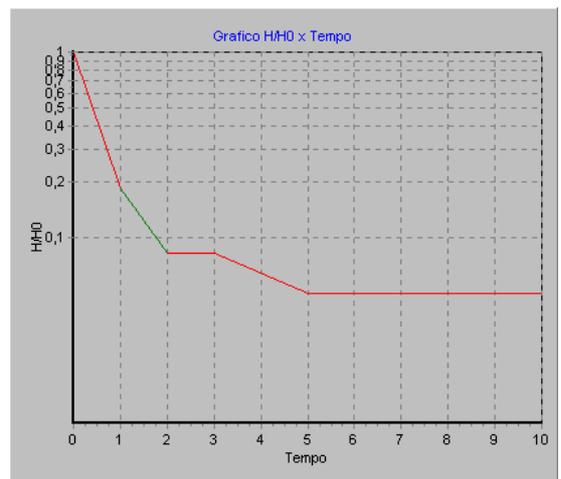
TS 46 (tempo em segundos)



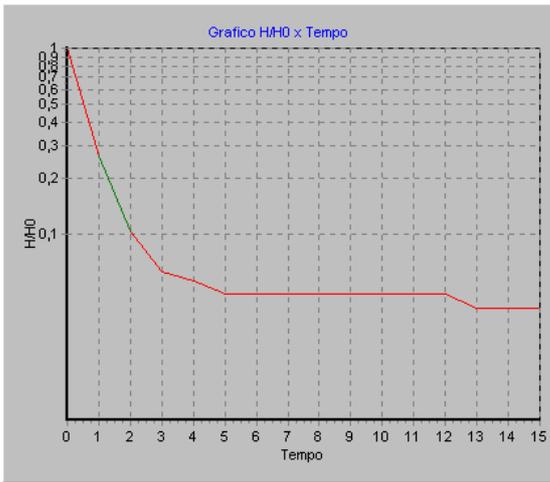
TS 47 (método Hvorslev, tempo em segundos)



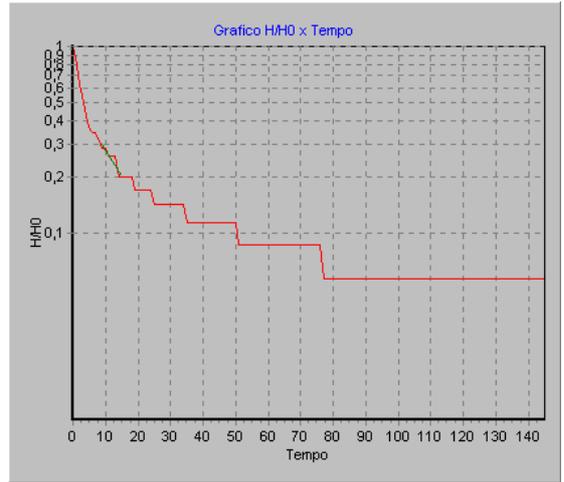
TS 48 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



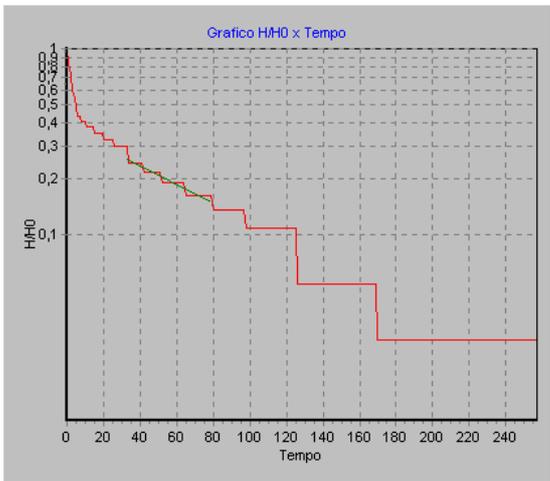
TS 49 (tempo em segundos)



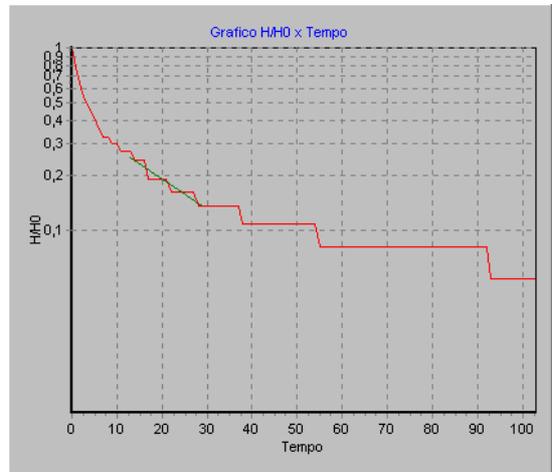
TS 50 (tempo em segundos)



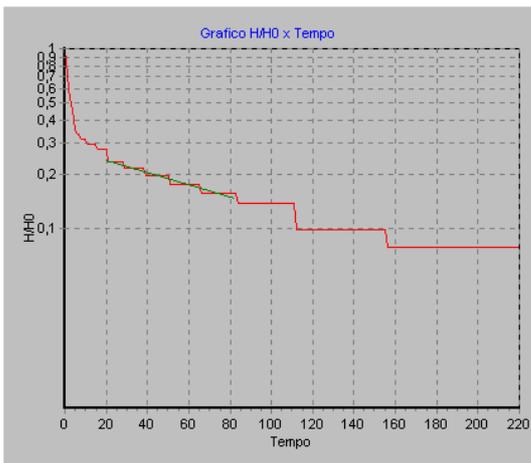
TS 51 (método Bower & Rice, tempo em segundos)



TS 52 (método Hvorslev, tempo em segundos)



TS 53 (método Hvorslev, tempo em segundos)



TS 54 (método Hvorslev, tempo em segundos)