

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**TÉCNICAS E FERRAMENTAS PARA DETERMINAÇÃO DE
PROPRIEDADES HIDRÁULICAS EM AQUÍFEROS FRATURADOS**

Fábio Sartorio

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Antonio Bertolo

Co-orientador: MSc. Marcos Bolognini Barbosa

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2016 / 15)

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

TÉCNICAS E FERRAMENTAS PARA A DETERMINAÇÃO DE
PROPRIEDADES HIDRÁULICAS EM AQUÍFEROS FRATURADOS

Fábio Sartorio

(Fábio Sartorio)



O CD-Rom encontra-se no setor de referência

Reginaldo Antonio Bertolo

(Reginaldo Antonio Bertolo)

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2016 / 15)

IGc-Instituto de Geociências



Técnicas e ferramentas para determinação de
propriedades hidráulicas em aquíferos fraturados.
M27133

SÃO PAULO
2016

S 254
F. 1

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOLOGIA

TÉCNICAS E EXPERIMENTOS PARA A DETERMINAÇÃO DE
PROPRIEDADES FÍSICAS EM AQUELAS EM AQUELAS EM AQUELAS

José Antonio

Geólogo

Geólogo

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
1970-1971

200 PÁG.
1970

Dedico este trabalho à responsável pelas
minhas maiores alegrias nos últimos anos,
Carol.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Reginaldo Bertolo pela confiança e oportunidade de desenvolver este projeto.

Agradeço ao pessoal do CEPAS: Cesar, Daphne, Paulo, Sergio, Silvia, e especialmente ao Marcos, por me ensinar tantas coisas e me ajudar nas atividades realizadas.

Agradeço à minha mãe, Stella. Obrigado por cada dia de trabalho, cada palavra de orientação e por todos os gestos de amor.

Agradeço ao meu irmão, Renan, pela companhia de todos esses anos, por ser a pessoa que melhor me compreende, pela certeza de que sempre seremos parceiros.

Agradeço à Caroline pelo carinho, pelo apoio, por fazer de cada dia uma lembrança feliz. Obrigado por tudo que aprendi em sua companhia, minha professora.

Agradeço aos amigos e colegas da turma 55 por marcarem essa etapa tão importante em da minha vida. Que daqui em diante todos lutem e tenham iniciativa para realizar seus sonhos.

RESUMO

O conhecimento sobre aquíferos fraturados ainda é muito limitado no Brasil. Apesar do desenvolvimento de algumas pesquisas na última década, o atual cenário de estudos hidrogeológicos e ambientais carece de metodologias específicas. Visando à expansão do conhecimento no campo hidrogeológico de meios fraturados, este trabalho utilizou técnicas e ferramentas de geofísica e vídeo filmagem para o reconhecimento e localização de fraturas em poços profundos, e a subsequente utilização desses poços para a execução de ensaios hidráulicos.

Os ensaios foram executados com a utilização de um sistema de obturadores pneumáticos, que são bexigas que formam selos subdividindo o poço quando infladas, com a finalidade de obter valores de carga hidráulica, condutividade hidráulica e transmissividade de intervalos discretos dos aquíferos estudados. No decorrer das atividades, houve um abrangente processo de capacitação para a utilização das diversas técnicas e ferramentas, empregando-as na caracterização e análise de dois poços profundos na Região Metropolitana de São Paulo, MP-01 e PP-01, perfurados em aquíferos fraturados. A interpretação dos dados produzidos pelas medições e pelos ensaios executados revelou as propriedades hidráulicas de porções discretas dos aquíferos, representadas dentro dos poços como sistemas dinâmicos de fluxo.

Foram executados ensaios hidráulicos e medidas de cargas hidráulicas em seis intervalos do poço MP-01, com sessenta metros de profundidade, evidenciando fluxo majoritariamente descendente. O intervalo de 38,5 a 40 metros que apresenta carga hidráulica de 94,86 metros e o maior valor de transmissividade ($1,75E-03 \text{ m}^2/\text{s}$) é a principal entrada de água do poço. Os intervalos de 44 a 45,5 metros e de 54,5 a 56 metros, ambos com transmissividade em torno de $2,2E-05 \text{ m}^2/\text{s}$ e cargas hidráulicas de 94,47 e 94,34 metros, respectivamente, são as principais saídas de água.

No poço PP-01, com trezentos metros de profundidade, foram executados ensaios hidráulicos e medidas de cargas hidráulicas em quatro intervalos, localizados entre 200 e 250 metros. As transmissividades calculadas são relativamente baixas, com os maiores valores nos intervalos de 227 a 229 metros e de 247 a 249 metros ($1,43E-05 \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,63E-05 \text{ m}^2/\text{s}$ respectivamente). Uma das hipóteses estabelecidas sugere que o maior fluxo de água no poço ocorre entre essas duas fraturas, com um gradiente hidráulico de $6,48E-03$.

Palavras-chave: ensaio hidráulico, obturador pneumático, aquífero fraturado, transmissividade.

ABSTRACT

The knowledge on fractured-rock aquifers is still very limited in Brazil, despite the development of some researches over the last decade, the current scenario of hydrogeological and environmental studies lacks specific methodologies. Aiming at the expansion of knowledge on the fractured rock hydrogeology, this work used geophysical logs and imaging equipment for the location and characterization of fractures in deep wells, and the subsequent use of those wells for hydraulic tests.

The wells were tested using inflatable packers for the determination of hydraulic head, hydraulic conductivity and transmissivity for depth-discrete intervals of the aquifer. During this work there was an intense learning process for the application of the technics and equipment, using them to analyze and characterize two deep wells in São Paulo Macrometropolis, MP-01 and PP-01, placed in fractured rock environment. Hydraulic properties of depth-discrete intervals of the aquifer determined by the tests and measurements were observed in the boreholes as dynamic flow systems.

Hydraulic tests and measurements performed for six depth-discrete intervals in the MP-01 well, sixth meters deep, evidenced down flow flux. The interval between 38.5 and 40 meters shows hydraulic head value of 94.86 meters and the biggest transmissivity value ($1.75\text{E-}03 \text{ m}^2/\text{s}$), it's been determined as the well's main water inlet. The intervals between 44 and 45.5 meters and between 54.5 and 56 meters, both showing transmissivity around $2.2\text{E-}05 \text{ m}^2/\text{s}$ and hydraulic head values of 94.47 and 94.34 meters respectively, are the main water outlets.

For the PP-01 well, thirteen meters deep, hydraulic tests and measurements were performed in four discrete intervals, located between 200 and 250 meters. The transmissivities are relatively low, with the intervals between 227 and 229 meters and between 247 and 249 meters showing the highest values ($1.43\text{E-}05 \text{ m}^2/\text{s}$ and $1.63\text{E-}05 \text{ m}^2/\text{s}$ respectively). One of the established hypothesis suggests that the main water flux occurs between the described fractures, with a hydraulic gradient of $6.48\text{E-}03$.

Keywords: hydraulic test, straddle packer, fractured-rock aquifer, transmissivity.

SUMÁRIO

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
3.1. Investigação de aquíferos fraturados	2
3.2. Reconhecimento estrutural inicial de aquíferos fraturados	3
3.3. Utilização de perfilagens geofísicas em estudos de aquífero fraturado.....	3
3.4. Utilização de obturadores pneumáticos para a medição de cargas hidráulicas e execução de ensaios hidráulicos	4
3.5. Execução e interpretação de ensaios hidráulicos dos tipos <i>slug</i> e <i>bail</i>	5
3.6. Áreas de estudo.....	8
4. MATERIAIS E MÉTODOS	10
4.1. Perfuração e instalação dos poços.....	10
4.2. Câmera de filmagem.....	10
4.3. Sonda geofísica de televisionamento acústico	11
4.4. Unidade móvel de pesquisa.....	13
4.4.1. <i>Instalação e operação dos equipamentos</i>	14
4.4.2. <i>Ensaio hidráulico</i>	17
4.5. Tratamento dos dados	18
5. RESULTADOS OBTIDOS	20
5.1. Câmera de filmagem e sonda geofísica de televisionamento acústico	20
5.2. Unidade móvel de pesquisa e ensaios hidráulicos	21
5.3. Resultados obtidos com o tratamento dos dados	23
6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	25
6.1. Câmera de filmagem e sonda geofísica de televisionamento acústico	25
6.2. Operação da unidade móvel de pesquisa e ensaios hidráulicos	27
6.2. Tratamento e interpretação dos dados.....	27
7. CONCLUSÃO.....	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Equação da lei cúbica.	3
Figura 2. Fluxograma para a condução de ensaios hidráulicos.	6
Figura 3. Exemplo de análise gráfica pelo método de Hvorslev.	7
Figura 4. Equação da condutividade hidráulica.	8
Figura 5. Equação do <i>shape factor</i>	8
Figura 6. Mapa geológico da região. Localização dos poços MP-01 e PP-01.	9
Figura 7. Filmagem para poços.	11
7.1. Câmera de filmagem para poços.	
7.2. Guincho operador da câmera.	
7.3. Fratura na parede do poço.	
7.4. Zona de afunilamento do poço.	
Figura 8. Equipamento geofísico.	12
8.1. Sonda de televisionamento acústico.	
8.2. Guincho com <i>data logger</i> acoplado.	
8.3. Tripé e cabo de sustentação/transmissão.	
8.4. Plataforma do <i>software</i> WellCad.	
Figura 9. Modelo esquemático da unidade móvel de pesquisa.	14
Figura 10. Instalação dos equipamentos.	15
10.1. Posicionamento do unidade móvel de pesquisa.	
10.2. Obturadores pneumáticos de diferentes diâmetros.	
10.3. Conexão selante dos tubos de PVC.	
10.4. Tubo de PVC para fora do poço, via de comunicação hidráulica.	
Figura 11. Esquema do sistema de obturadores instalado em poço.	16
Figura 12. Ensaios hidráulicos.	17
12.1. Bomba de pressão e vácuo.	
12.2. Conexão selante com vácuo manômetro acoplado.	
Figura 13. Sequência esquemática de ensaio <i>bail</i>	18
Figura 14. Exemplo gráfico de ensaio <i>slug</i>	18
Figura 15. Exemplo de gráfico de interpretação de ensaio <i>slug</i>	19
Figura 16. Estereograma das fraturas do poço MP-01.	25
Figura 17. Estereograma das fraturas do poço PP-01.	26

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Dificuldades relacionadas à utilização de obturadores pneumáticos.	5
Tabela 2. Diâmetro de perfuração de cada intervalo do poço PP-01.....	10
Tabela 3. Ensaios executados para intervalos do poço MP-01.	21
Tabela 4. Ensaios executados para intervalos do poço PP-01.....	22
Tabela 5. Transmissividades do poço MP-01.	23
Tabela 6. Transmissividades do poço PP-01.....	24
Tabela 7. Ensaios selecionados para definição das médias de T do poço MP-01.	28
Tabela 8. Ensaios selecionados para definição das médias de T do poço PP-01.....	29

1. INTRODUÇÃO

Há poucos anos os estudos em aquíferos fraturados no Brasil se restringiam a investigações sobre a produção de água de poços de abastecimento locados nessas unidades geológicas, com pouca ou nenhuma informação a respeito dos aquíferos analisados e suas dinâmicas de fluxo (Fiume 2013). A falta de informação sobre fraturados prejudica principalmente os setores de perfuração de poços de produção e investigação ambiental, impossibilitando inclusive a realização de requerimentos por órgãos ambientais governamentais para providenciar ações de gerenciamento e remediação para esses aquíferos. O desenvolvimento de conhecimento nessa área tem como principal desafio a complexidade dos aquíferos fraturados, por serem heterogêneos e anisotrópicos, demandando a aplicação de práticas e conhecimentos específicos para a compreensão da geometria e das propriedades hidráulicas desses meios.

O Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas da Universidade de São Paulo (CEPAS – USP) é pioneiro no desenvolvimento dos principais trabalhos na área de estudos de aquíferos fraturados (e.g. Alves, 2008; L'Apicciarella, 2009; Fernandes et al., 2011; Wahnfried, 2010; Ribeiro, 2012; Fiume, 2013; Barbosa, 2015), com foco na investigação de áreas contaminadas. Em parceria com a Universidade de Guelph, no Canadá, vem empregando, no Brasil, metodologias consagradas no exterior para estudo de meios fraturados, ampliando as possibilidades de pesquisa no panorama nacional. Idealizado em meio aos projetos do CEPAS – USP, o presente trabalho tem como meta a aplicação de técnicas e ferramentas para a obtenção de informações acerca das propriedades hidráulicas de aquíferos fraturados, contribuindo para a expansão do conhecimento nesse campo da hidrogeologia.

Neste trabalho foi utilizada uma sonda geofísica de imageamento acústico para a identificação e localização de fraturas em dois poços profundos na Região Metropolitana de São Paulo. A partir dessa análise inicial foram executados ensaios hidráulicos com a utilização de um sistema de obturadores pneumáticos, bexigas que isolam intervalos em poço tubulares, que é uma técnica descrita e amplamente utilizada por Quinn et al. (2010, 2011, 2012, 2013, 2015) e Meyer et al. (2008). As informações obtidas com os ensaios foram tratadas e interpretadas pelo método de Hvorslev (1951), que é baseado em modelos matemáticos para a determinação de propriedades hidráulicas de aquíferos.

2. OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo principal a utilização de técnicas e ferramentas de alta resolução para a determinação de cargas hidráulicas e propriedades hidráulicas em aquíferos fraturados por meio de poços profundos. Por se tratar de um estudo aplicado, fez parte deste trabalho a análise de dois poços profundos localizados no complexo Embu, na Região Metropolitana de São Paulo. Para que o objetivo principal fosse alcançado, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- realização de perfilagens geofísicas nos poços;
- desenvolvimento e operação de uma unidade móvel de pesquisa para estudos em aquíferos fraturados;
- medição de cargas hidráulicas e execução de ensaios hidráulicos do tipo *slug* e *bail* em poços profundos utilizando um sistema de obturadores pneumáticos; e
- tratamento e interpretação dos ensaios do tipo *slug* e *bail*.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Investigação de aquíferos fraturados

A investigação de aquíferos fraturados envolve alguns conhecimentos específicos acerca da geometria da rede de fraturas e de suas propriedades hidráulicas. Segundo Domenico & Schwartz (1990), seriam três os parâmetros estruturais responsáveis pela caracterização do fluxo de água: abertura, conectividade e densidade das fraturas. A determinação de tais fatores é uma tarefa complexa, que demanda técnicas e equipamentos específicos. Novakowski et al. (1995) sustenta que os estudos de fluxo em aquíferos fraturados podem ser realizados com base em fraturas individuais ou grupos de fraturas, pelo método denominado de meio descontínuo, sendo um dos requisitos para sua aplicação o valor de condutividade hidráulica (K) das fraturas. A condutividade hidráulica relaciona-se à densidade de fraturas e à abertura das fraturas por meio da lei cúbica (**fig. 1**), derivada da lei de Darcy por Snow (1968), permitindo quantificar o fluxo de água em um grupo de fraturas.

Portanto, para a investigação bem sucedida da dinâmica de fluxo em um aquífero fraturado, é necessária a definição das principais famílias de fraturas responsáveis pela migração da água, o que é possível pelo conhecimento da geometria e conectividade dessas famílias, suas propriedades hidráulicas e da distribuição das cargas hidráulicas. Na prática, o mais usual é a determinação da condutividade hidráulica (K) e da transmissividade (T) de intervalos do aquífero por meio de medições e ensaios de campo, atividades abordadas pelo presente trabalho, e posteriormente a partir na lei cúbica inferir sobre a geometria da rede de fraturas.

$$K = \frac{\rho g}{12\mu} * Nb^3$$

Figura 1: equação da lei cúbica.

ρ – densidade da água;

g – aceleração da gravidade;

μ – viscosidade dinâmica;

N – número de fraturas por unidade de distância;

b – abertura das fraturas;

Nb – porosidade planar.

3.2. Reconhecimento estrutural inicial de aquíferos fraturados

Em estudos mais abrangentes, as atividades abordadas neste trabalho ocorreriam depois do reconhecimento estrutural inicial (Parker, 2011). Esses estudos iniciam-se a partir de investigações estruturais mais simples, localizando e descrevendo fraturas em superfície, por meio de afloramentos. Em seguida, a elaboração de seções geológicas evidencia a distribuição espacial e as variações de espessura dos depósitos terciários e do manto de intemperismo e a profundidade do embasamento. Esses dados são utilizados para identificar lineamentos em mapas locais e regionais, a fim de definir de maneira rápida e indireta os principais *trends* estruturais da área (O'Leary et al., 1976). Em seguida, é realizada uma etapa de campo em que são visitados afloramentos da região estudada e, por meio de *scanlines* e observações pontuais, são coletados parâmetros como: ocorrência de fraturas isoladas ou de zonas de fraturas; espaçamento entre as fraturas; direção, caimento, espessura e preenchimento de fraturas; presença de água e/ou vegetação ao longo de fraturas etc (Fiume, 2013). É importante atentar às variações litológicas, uma vez que diferentes litotipos podem apresentar diferentes comportamentos mecânicos, desenvolvendo padrões de fraturamento distintos, e o contato entre litologias pode originar um caminho preferencial de fluxo.

3.3. Uso de perfilações geofísicas em estudos de aquífero fraturado

Após as primeiras investigações estruturais em superfície, iniciam-se as etapas de estudo diretamente no aquífero, em que são utilizadas técnicas mais sofisticadas de aplicação específica para o reconhecimento e a caracterização de fraturas em poços. Nas últimas décadas, diversos estudos hidrogeológicos tem feito uso de métodos geofísicos para estudo de aquíferos fraturados, por exemplo: Paillet & Ollila (1994), Barton et al. (1995), Paillet (1995), Morin et al. (1997 e 2000) e Johnson et al. (2002), e, mais recentemente no Brasil, L'Apicciarella (2009), Wanhfried (2010), Ribeiro (2012) e Fiume (2013). Métodos geofísicos de investigação

são largamente utilizados por fornecerem dados úteis, principalmente em etapas iniciais de investigação, mediante um custo relativamente baixo e uma logística simples. Destacam-se desde métodos mais convencionais, como perfis de calibre do poço, irradiação gama natural da formação, perfis de indução eletromagnética, temperatura e condutividade da água, até métodos mais sofisticados, como perfis de imageamento ótico e acústico.

O método geofísico de imageamento acústico de poços é atualmente uma técnica consagrada principalmente na indústria do petróleo, responsável por seu desenvolvimento ao final dos anos 1960. Sua plena utilização em estudos de águas subterrâneas teve início no decorrer da década de 1990, com o desenvolvimento de ferramentas compatíveis à utilização e registro de dados para poços (Williams & Johnson, 2004). Perfis acústicos e óticos geram imagens contínuas e orientadas, permitindo a identificação das feições e descontinuidades da rocha (Williams & Johnson, 2004). O perfilador ótico utiliza uma câmeras de filmagem, enquanto o perfilador acústico funciona como um ultrassom, captando a respostas de ondas ultrassônicas emitidas em direção à parede do poço. Paredes sujas e água turva limitam a utilização do perfilador ótico (Johnson et al., 2005), mas não interferem no funcionamento do perfilador acústico (Williams & Johnson, 2004).

3.4. Utilização de obturadores pneumáticos para a medição de cargas hidráulicas e execução de ensaios hidráulicos

Uma vez localizadas e caracterizadas as fraturas que interceptam um determinado poço, o próximo passo é a medição de cargas hidráulicas e a execução de ensaios hidráulicos fratura a fratura, o que é possível por meio de métodos que possibilitem isolar hidraulicamente intervalos discretos do poço (Quinn et al., não publicado). Atualmente dois equipamentos com concepções semelhantes são utilizados nesse processo: sistemas multinível e obturadores pneumáticos. Um sistema multinível utiliza obturadores de instalação permanente, posicionados no poço de maneira a isolar hidraulicamente intervalos para monitorá-los separadamente. Esse sistema permite o isolamento simultâneo de todos os intervalos por um longo período de tempo, anulando o máximo possível os efeitos gerados pela comunicação artificial causada pelo poço (Meyer et al., 2008 e 2014). Os elevados custo e tempo de instalação e a inutilização do poço para quaisquer outras atividades são fatores limitantes para sua utilização.

Obturadores pneumáticos constituem um sistema móvel, permutável entre posições dentro do mesmo poço e entre diferentes poços, com a igual finalidade de isolar hidraulicamente intervalos discretos. É um sistema com custo relativamente menor, pensado para utilização em poços já instalados, como por exemplo poços de abastecimento. O equipamento pode ser utilizado em poços de diâmetros variados, demandando relativamente pouco tempo para a análise de cada poço. A agilidade e a mobilidade do sistema têm como contraponto a menor acurácia nos dados obtidos, pelo fato do sistema isolar intervalos curtos

e permitir menor tempo de estabilização do aquífero (Quinn et al., 2010, 2011, 2012, 2013, 2015).

Wahnfried (2010) e Quinn et al. (2010, 2011, 2012, 2013, 2015) descrevem em detalhe um sistema de obturadores pneumáticos e sua utilização em múltiplos ensaios hidráulicos de alta resolução. Algumas das possíveis dificuldades e soluções na utilização dos obturadores relatados por Quinn et al. (2012) são destacadas a seguir:

Dificuldade	Identificação	Solução
Conexão entre as zonas isoladas devido à má vedação entre o obturador e a parede do poço.	Elevação instantânea da pressão nos intervalos superior ou inferior ao se executar um ensaio no intervalo central.	Elevação da pressão nos obturadores ou reposicionamento do conjunto de obturadores; verificação das condições do poço por vídeo.
Conexão entre as zonas isoladas devido à comunicação pelas fraturas da formação.	Elevação retardada da pressão nos intervalos superior ou inferior ao se executar um ensaio no intervalo central.	Execução de ensaios com menor fluxo/pressão.

Tabela 1: dificuldades relacionadas à utilização de obturadores pneumáticos, com as respectivas identificações e soluções. (Modificado de Quinn et al., 2012).

O sistema de obturadores pneumáticos não possui meios para localizar as fraturas ou determinar os pontos de interesse para análise dentro dos poços. Não é, portanto, uma ferramenta para estudos iniciais e seu uso está condicionado à caracterização prévia dos poços pelos métodos geofísicos descritos (Quinn et al., 2012).

3.5. Execução e interpretação de ensaios hidráulicos dos tipos *slug* e *bail*

A partir do isolamento hidráulico de intervalos discretos do poço, podem ser executados ensaios dos tipos *slug* e *bail*, pelo meio dos quais são calculados os valores de condutividade hidráulica (K) e transmissividade (T) de porções discretas do aquífero. As principais vantagens desses ensaios são a simplicidade do equipamento necessário, sua rapidez e o fato de não gerarem efluentes. Há diversas referências a sua aplicação no contexto de aquíferos fraturados, por exemplo: Schwartz (1975), Barker & Black (1983), Shapiro & Hsieh (1998), Lee & Lee (1999), Svenson et al. (2007) e Schweisinger et al. (2009).

Os ensaios *slug* e *bail* são executados a partir da elevação (para o *slug*) ou do rebaixamento (para o *bail*) instantâneos do nível de água dentro do poço e do monitoramento da recuperação do nível estabilizado. Essa recuperação ocorre devido ao fluxo de água

proveniente das fraturas, provocado pela variação da carga hidráulica no intervalo isolado. Diferentemente do presente trabalho, na literatura ambos os ensaios são comumente designados como ensaios *slug*, diferenciados como *rising-head (bail)* e *falling-head (slug)*.

É indicada em Quinn et al. (2012) a melhor forma na condução desses ensaios hidráulicos com o uso de obturadores pneumáticos (fig. 2), apontando também ensaios complementares, não abordados no presente trabalho.

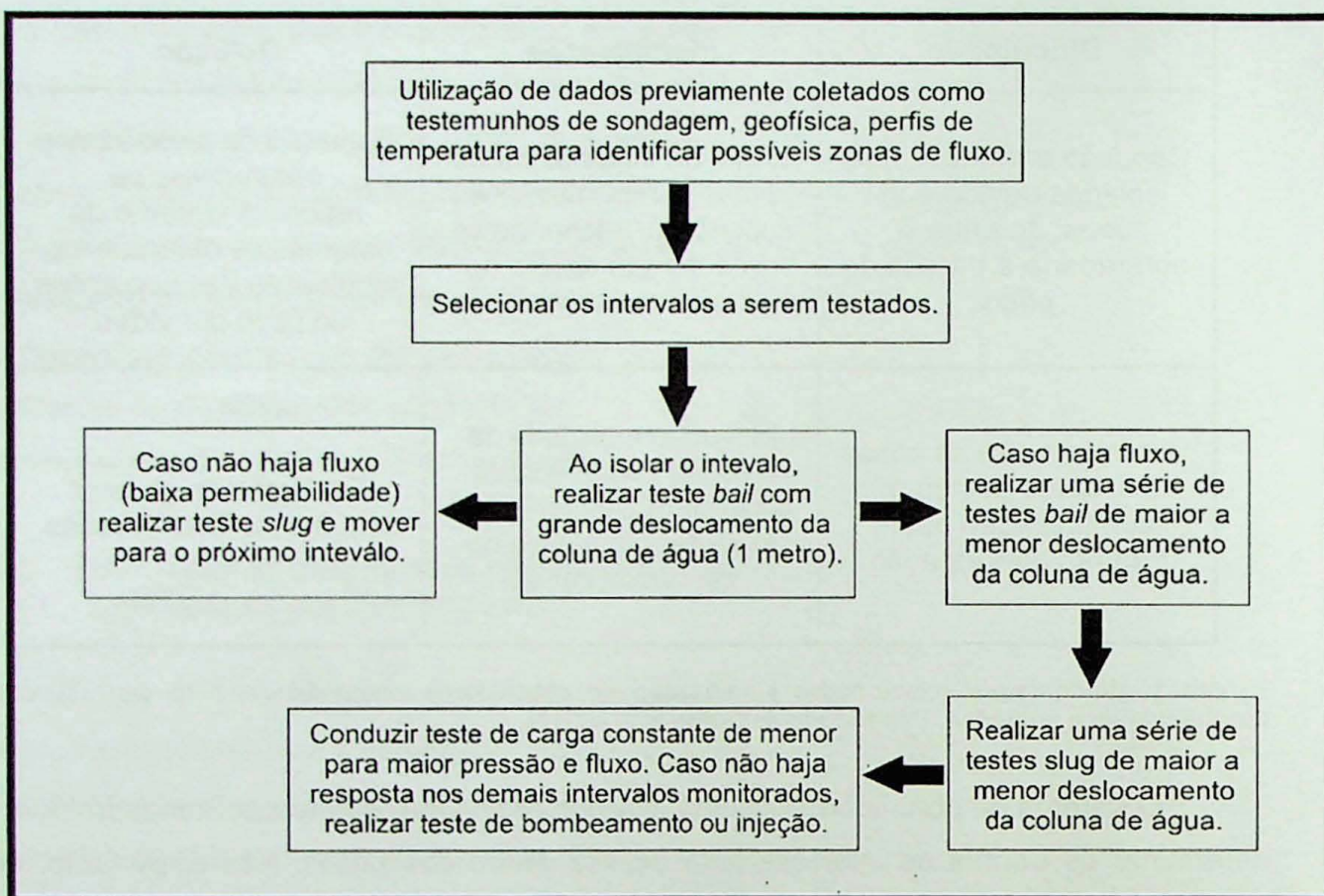


Figura 2: fluxograma para a condução de ensaios hidráulicos utilizando obturadores pneumáticos. (Modificado de Quinn et al., 2012).

Após a execução dos ensaios, são analisados e interpretados os dados de variação da coluna de água por tempo, obtendo assim os valores de condutividade hidráulica e transmissividade dos intervalos. Hvorslev (1951) foi um dos primeiros estudiosos a indicar o uso de ensaios *slug/bail* para a determinação da condutividade hidráulica *in situ*. O autor desenvolveu modelos matemáticos para a interpretação desses ensaios e determinação das propriedades hidráulicas do aquífero, levando em consideração variáveis como a geometria dos poços e homogeneidade e anisotropia dos aquíferos. O método de análise de Hvorslev é discutido em diversos estudos, por exemplo: Cedergren (1967), Lambe & Whitman (1969), Freeze & Cherry (1979), Fetter (1988) e Chirlin (1989).

O método consiste em uma análise gráfica de cada ensaio *slug* e *bail*, a partir da qual obtém-se a equação da reta, utilizada diretamente no cálculo da condutividade hidráulica e da transmissividade para o intervalo ensaiado. O gráfico analisado (fig. 3) tem seu eixo X

correspondente ao tempo (segundos) e o eixo Y correspondente a variação de deslocamento da coluna de água dividido pelo deslocamento inicial do ensaio ($\Delta H/\Delta H_0$) em escala logarítmica, descrito a seguir:

ΔH_0 – corresponde à variação total de altura da coluna de água gerada artificialmente para a execução do ensaio *slug* ou *bail*;

ΔH – corresponde à altura da coluna de água dos ensaios *slug* ou *bail* em um tempo t , ou seja, é igual a ΔH_0 menos a variação da coluna de água em um tempo t do ensaio.

A partir do gráfico gerado, é ajustada uma reta linear partindo da origem, com o grau de ajuste da reta determinado pelo R^2 , que varia de zero a um, sendo um o melhor ajuste possível. Da equação da reta obtém-se a inclinação da reta, utilizada diretamente na determinação da condutividade hidráulica (K).

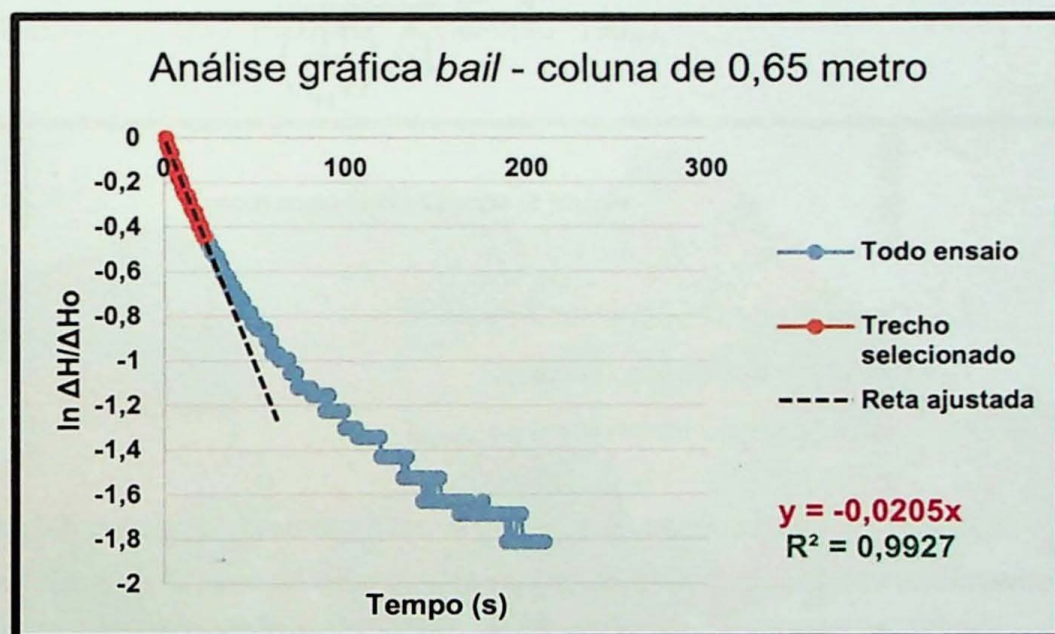


Figura 3: exemplo de análise gráfica pelo método de Hvorslev. Eixo Y - $\ln \Delta H/\Delta H_0$; eixo X – tempo (segundos); trecho ao qual a reta é ajustada em laranja; reta ajustada em preto; R^2 em verde; equação da reta em vermelho, com inclinação da reta igual a '-0,0205'.

A condutividade hidráulica (K) é determinada por meio da equação:

$$K = \frac{m * A}{F}$$

Figura 4: equação da condutividade hidráulica.

m – inclinação da reta;

A – área da seção transversal do poço;

F – *shape factor*.

O *shape factor* (F) é determinado por meio da equação:

$$F = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{r_0}{r_w}\right)}$$

Figura 5: equação do *shape factor*.

L – Comprimento do intervalo ensaiado;

r_0 – raio de influência do ensaio;

r_w – raio da seção transversal do poço.

O raio de influência do ensaio (r_0) é um parâmetro fundamentalmente empírico, não efetivamente um raio de influência de um ensaio *slug* ou *bail*. O valor utilizado pode variar até duas ordens de grandeza, dependendo da permeabilidade do aquífero (Butler, 1997). Por fim, a transmissividade é calculada multiplicando o valor obtido para a condutividade hidráulica (K) pelo comprimento do intervalo ensaiado (L).

3.6. Áreas de estudo

As áreas do aquífero estudado situam-se na região da Bacia de São Paulo, sobre o embasamento cristalino, unidade geológica de maior interesse para este trabalho (**fig. 6**). O embasamento nessa região é constituído por rochas granitóides foliadas, xistos, quartzitos, anfibolitos e granitos sin e pós-tectônicos, cisalhados até gnaisses miloníticos e blastomiloníticos em porções adjacentes a zonas de movimentação tectônica intensa (Coutinho, 1980). De idade Pré-Cambriana, o embasamento é representado por duas

porções: a primeira com ortognaisses e migmatitos do Complexo Paraíba do Sul, denominado Complexo Rio Capivari em sua porção a sudeste da Bacia de Taubaté (Fernandes, 1991); e uma segunda porção com unidades do Complexo Embu, rochas metassedimentares de fácies anfibolito, representadas por micaxisto, quartzitos e rochas cálcio-silicáticas, com anfibolitos associados, moderadamente migmatizadas com estruturas bandadas ou estromatólitos. O Complexo Embu ainda apresenta xistos e filitos de baixo grau metamórfico, podendo corresponder a porções das rochas metassedimentares que sofreram metamorfismo em condições de temperatura baixa, e rochas gnáissicas polimigmatizadas e polideformadas, constituintes do complexo granito-gnáissico-migmatítico (Hasui, 1994).

A Bacia de São Paulo corresponde a um semi-graben basculado para NNW, limitado a noroeste pelas zonas de cisalhamento Taxaquara e Rio Jaguari, de direção NE-SW, e constitui-se da base para o topo por: arenitos e arenitos conglomeráticos de leques aluviais da Formação Resende, folhelhos escuros lacustres da Formação Tremembé e arenitos fluviais da Formação São Paulo, pertencentes ao Grupo Taubaté, superpostos pelos sedimentos fluviais da Formação Itaquaquetuba e sedimentos colúvio-aluvionares do quaternário (Riccomini, 1989; Riccomini & Coimbra, 1992).

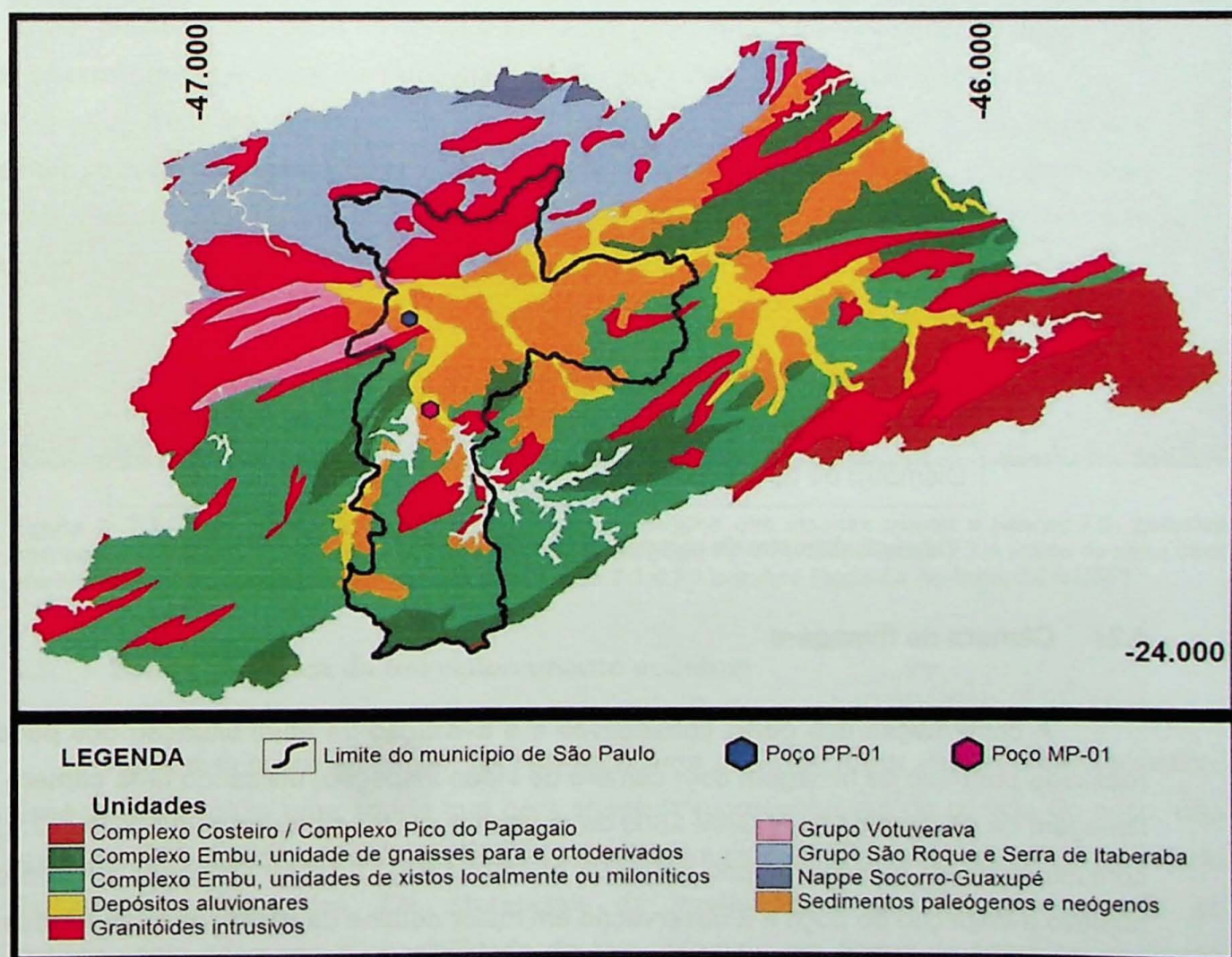


Figura 6: mapa geológico da região, localização dos poços MP-01 e PP-01. (Modificado de Monteiro, 2012)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item são apresentados de forma sequencial os materiais utilizados e métodos aplicados no estudo das propriedades hidráulicas de aquíferos fraturados. Os trabalhos foram realizados em duas áreas, a primeira dentro de uma indústria (Ergomat) próxima ao Canal do Jurubatuba, zona sul da cidade de São Paulo, onde foi perfurado um poço para estudos ambientais (MP-01). A segunda área localiza-se ao lado do Instituto de Geociências (IGc) da Cidade Universitária em São Paulo, em um poço escola (PP-01).

4.1. Perfuração e instalação dos poços

O poço MP-01 (Ergomat) (**anexo I, fig. 1**) foi construído por perfuração em rocha realizada pela empresa Engesolos, utilizando uma sonda rotativa com circulação de água. O diâmetro da perfuração foi de cinco polegadas até atingir a rocha e a dezesseis metros. Nesse trecho superficial está instalado um tubo de revestimento com selo composto por uma mistura de bentonita e cimento, para que o poço não seja um canal de comunicação entre o aquífero sedimentar superior e o aquífero fraturado. A partir do topo do embasamento, a perfuração tem diâmetro de quatro polegadas, até o fundo do poço a sessenta metros.

O poço PP-01 (IGc) (**anexo I, fig. 2**) foi instalado pela empresa Jundsondas com a finalidade de abastecimento, mas não apresentou boas condições para exploração. A perfuração, realizada por uma sonda rotativa pneumática, varia em quatro diâmetros, esquematizados na **tab. 2**, sendo o diâmetro final de seis polegadas. O topo do embasamento está a cinquenta metros e o fundo do poço a trezentos metros, a cimentação e o tubo de revestimento vão até oitenta e nove metros.

Intervalo	0 - 18 m	18 - 50 m	50 - 89 m	89 - 300 m
Diâmetro do furo	12 1/4"	9 7/8"	8 1/2"	6"

Tabela 2: diâmetro de perfuração de cada intervalo do poço PP-01 (IGc).

4.2. Câmera de filmagem

A confirmação dos perfis construtivos e a avaliação da atual situação dos poços foi realizada por meio de filmagem com câmera de vídeo inspeção, utilizando uma câmera para filmagem de poços modelo R-CAM 1300 da marca Laval Underground Surveys (**fig. 7.1**), em conjunto com um guincho próprio para sua operação (**fig. 7.2**). As filmagens tiveram como objetivo a inspeção do poço e a observação em maior detalhe da rocha, de suas feições e da condição das possíveis fraturas de interesse para os ensaios hidráulicos. A câmera apresenta duas opções de filmagem, a visada frontal voltada para o fundo do poço, com a qual verificam-

se variações de diâmetro e descontinuidades (fig. 7.3), e a visada lateral, que permite observações em detalhe da parede do poço e das fraturas (fig. 7.4).

A vídeo inspeção é iniciada a partir da boca do poço, atentando a possíveis furos no revestimento e quebras nas conexões dos tubos. No caso de fissura no revestimento, é possível a verificação de entrada de água ou indícios de infiltração pela presença de alterações de cor, causadas por precipitação de óxidos ou proliferação de bactérias, mesmo abaixo do nível de água (Williams & Johnson, 2004). Com a visada lateral, é possível observar o aspecto e as condições da rocha e das fraturas.



Figura 7: 7.1 – câmera de filmagem para poço com detalhe das visadas frontal e lateral; 7.2- guincho operador da câmera; 7.3 – foto de fratura na parede do poço PP-01 (visada lateral); 7.4 – foto de zona com afunilamento do poço PP-01 (visada frontal). (Fotos 7.1 e 7.2 por Ana Paula de Andreis, ECA-USP).

4.3. Sonda geofísica de televisionamento acústico

Após a primeira inspeção, foi realizado uma perfilagem por imageamento acústico. Esse método utiliza uma sonda que gera imagens representativas da parede do poço, nas quais é possível a identificação de feições e descontinuidades da rocha, pertinentes ao estudo de aquíferos fraturados. Os diferenciais do imageamento acústico em relação ao imageamento ótico são a possibilidade de sua utilização em poços de baixa ou nenhuma visibilidade e a facilidade na identificação de fraturas em rochas de coloração escura (Williams

& Johnson, 2004). Não há necessidade de iluminação, nem há impedimento ao seu uso em poços com água turva ou com lama.

O equipamento utilizado para realizar as perfilagens dos poços foi uma sonda geofísica de imageamento acústico modelo QL40-ABI-2G, da marca Mount Sopris (**fig. 8.1**). Análoga a um sonar portátil, a sonda emite uma onda ultrassônica direcionada para a parede do poço, registrando sua amplitude e seu tempo de retorno. Com esses dois dados, é determinado precisamente o limite entre o fluido e a parede do poço, delineando as rugosidades e descontinuidades da superfície da rocha e estipulando o diâmetro e o ovalamento do furo, com os quais é gerada uma medida de calíper contínuo de alta precisão. Contrastes de impedância acústica entre o fluido do poço e a rocha indicam a dureza relativa do material, possibilitando constatar variações litológicas, foliações e acamamentos quando há contraste acústico suficiente (Williams & Johnson 2004).

A operação da sonda no poço é feita por um guincho de pequeno porte (**fig. 8.2**) e um tripé (**fig. 8.3**), de uso específico para esse equipamento de geofísica. O procedimento de perfilagem é realizado com a descida da sonda ao ponto mais baixo do poço, a partir de onde é feita a subida com velocidade de um a dois metros por minuto, garantindo melhor qualidade no registro dos dados. Os dados são transmitidos simultaneamente para a superfície por meio do cabo de sustentação do guincho, que também funciona como transmissor, na qual são processados e armazenados por meio de um *data logger* e um *notebook*, utilizando o *software* LoggerSuite.



Figura 8: 8.1 – sonda de televisionamento acústico com os dois centralizadores; 8.2 – guincho com *data logger* acoplado; 8.3 – tripé e cabo de sustentação/transmissão; 8.4 – plataforma do *software* WellCad. (Fotos 8.1, 8.2 e 8.3 por Ana Paula de Andreis, ECA-USP).

A sonda integra um sistema de orientação, constituído por um magnetômetro e um acelerômetro triaxiais, responsáveis por registrar, respectivamente, o norte magnético e a inclinação da ferramenta, permitindo o cálculo das direções e mergulhos verdadeiros das feições registradas. Para que sejam gerados dados com boa qualidade, a sonda deve estar bem centralizada no poço, o que é feito com o uso de dois centralizadores de material não magnético, para que não haja interferência com o magnetômetro. A posterior correção de azimuth devido à declinação magnética é feita com o uso do *software* WellCAD (**fig. 8.4**), desenvolvido pela empresa Advanced Logic Technology, utilizado para a visualização, tratamento e organização dos dados obtidos. O resultado final é uma imagem contínua e orientada do perfil vertical do poço (**anexo II, fig. 1, 2, 3 e 4**), na qual são identificadas as feições e as discontinuidades da formação e suas atitudes.

4.4. Unidade móvel de pesquisa

O estudo em escala de detalhe de aquíferos fraturados proposto neste projeto faz uso de uma unidade móvel de pesquisa (**fig. 9**), equipada com um sistema de obturadores pneumáticos projetado para executar ensaios em poços tubulares. Foram utilizados obturadores pneumáticos por apresentarem custo significativamente reduzido e possibilitarem a análise de ambos os poços estudados. O sistema isola hidráulicamente o poço em três zonas discretas e, por meio de uma tubulação central, permite a comunicação hidráulica direta com o intervalo isolado, utilizada para a execução de ensaios hidráulicos, atuando como um poço temporário dentro do poço analisado. Os principais componentes dessa unidade são: obturadores pneumáticos, tubos de conexão em aço inox, transdutores de pressão, conjunto de tubos de PVC com vedação interna por *O-ring*, tripé de alumínio, guincho com corrente, bomba de pressão e vácuo, tanques de nitrogênio, caixa d'água, bomba d'água, medidor de vazão, barômetro e *data logger*.

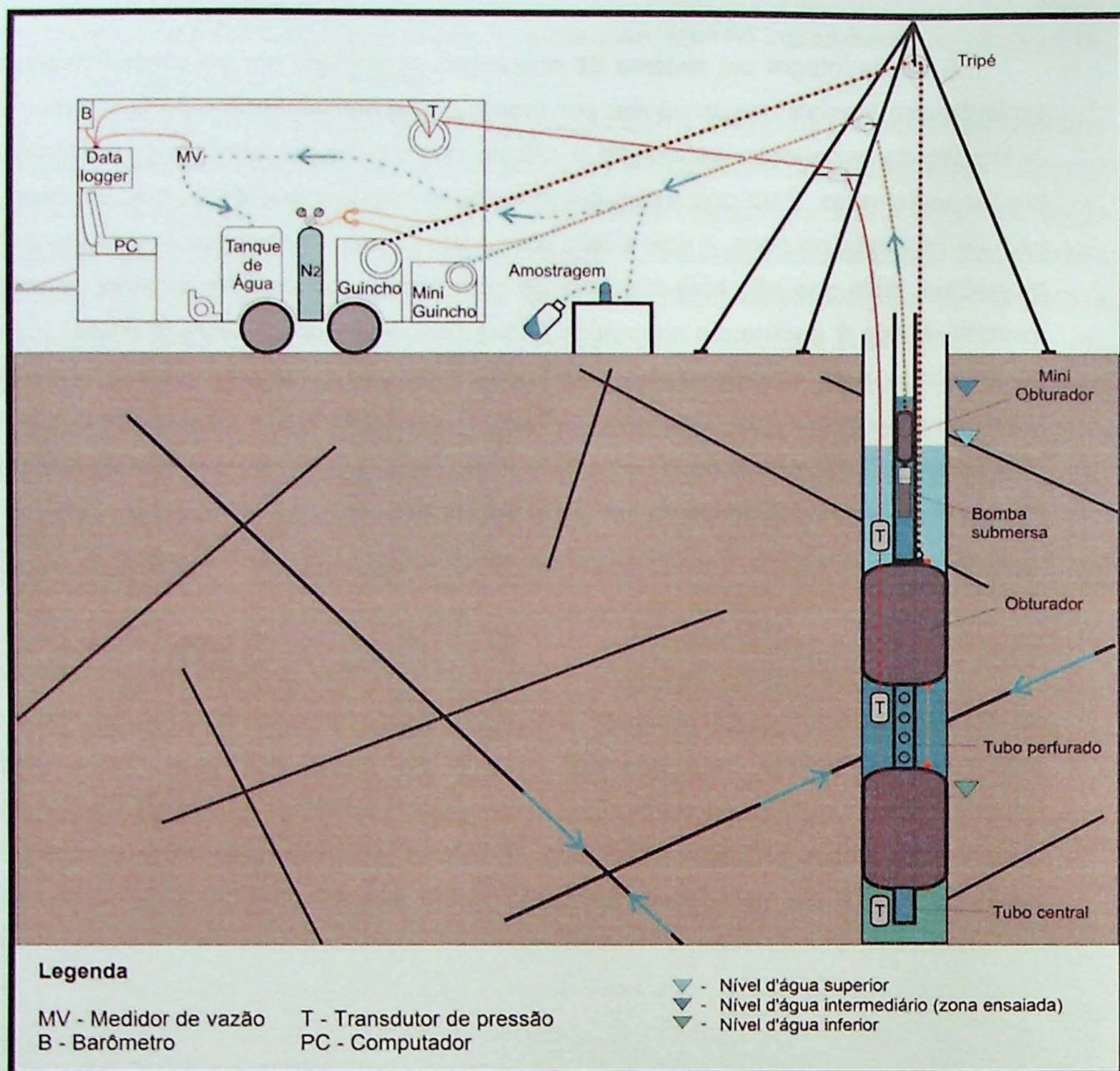


Figura 9: modelo esquemático da unidade móvel de pesquisa, com seus principais componentes em operação. Exemplo de procedimento de amostragem com bomba de pequeno porte, inserida no poço pelo tubo de PVC. (Modificado de Barbosa, em preparação).

4.4.1. Instalação e operação dos equipamentos

A instalação do equipamento tem início com o posicionamento da unidade móvel a uma distância entre três a cinco metros do poço, em seguida um tripé de alumínio, que atinge até quatro metros de altura, é erguido e centralizado sobre o poço (**fig. 10.1**). O sistema de obturadores é montado sobre cavaletes e, nesse momento, são selecionados: (1) o tamanho de obturadores a serem utilizados (**fig. 10.2**), de acordo com o diâmetro do poço; (2) o comprimento do tubo de aço inox conectado entre os obturadores, conforme a extensão desejada para os intervalos isolados. Transdutores de pressão são posicionados nas extremidades e no centro do sistema (**fig. 11**) e, por fim, é instalada a tubulação que fornece gás nitrogênio para inflar os obturadores. O conjunto é testado com o uso de gás nitrogênio

pressurizado para detectar eventuais vazamentos nas conexões e, em seguida, erguido sobre o poço com o auxílio do tripé e do guincho principal da unidade móvel.

Centralizado o equipamento sobre o poço, é iniciada a descida controlada com o guincho. Conforme é feita a descida, são acoplados tubos de PVC, vedados internamente por *O-ring* (fig. 10.3), à extremidade superior do sistemas de obturadores, de maneira a sempre manter o último tubo conectado para fora da boca do poço (fig. 10.4). Como mencionado, esses tubos são uma conexão direta com o intervalo central entre os obturadores, configurando uma via de comunicação hidráulica com a zona analisada, pelo meio da qual são executados os ensaios hidráulicos.

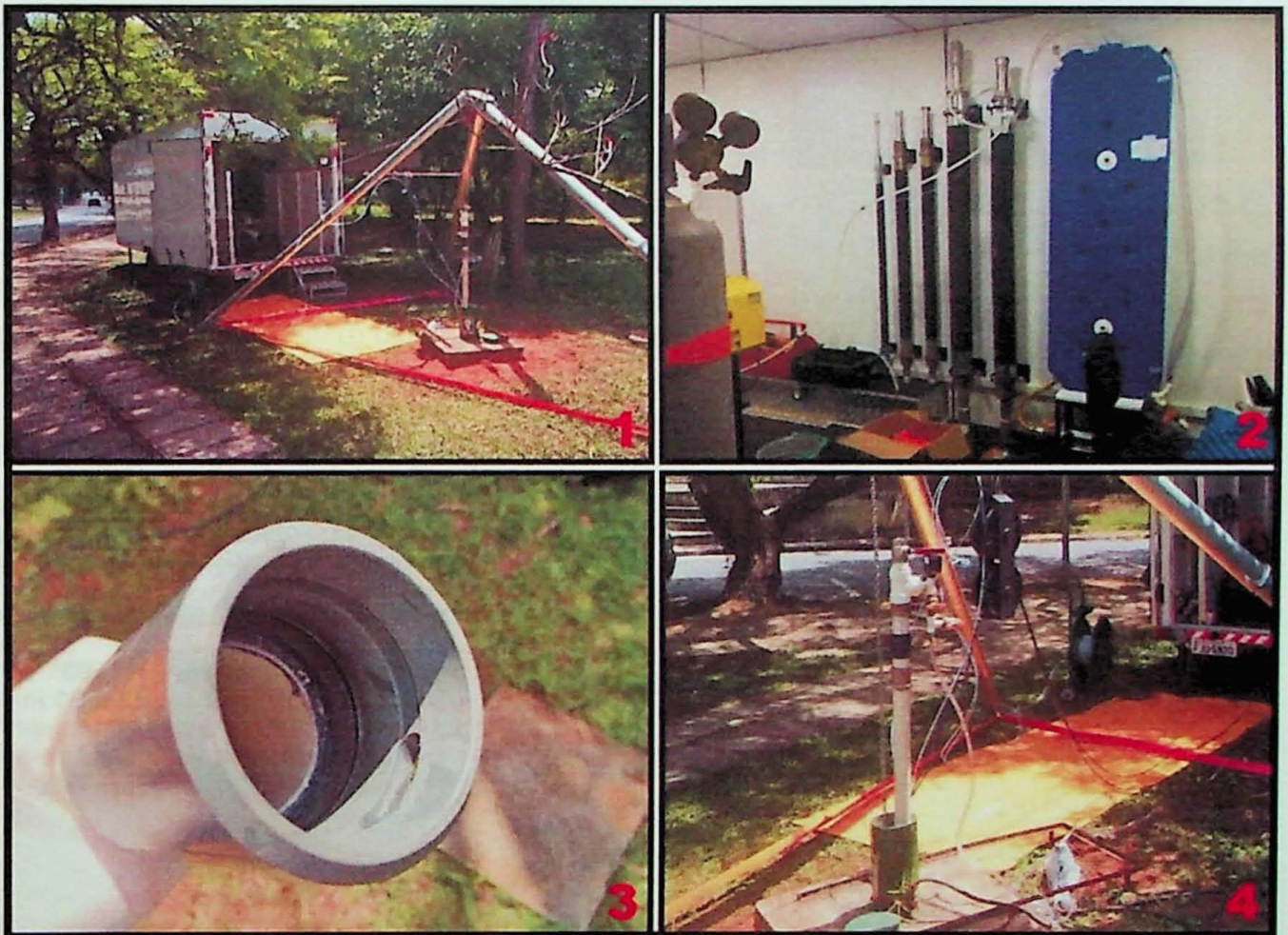
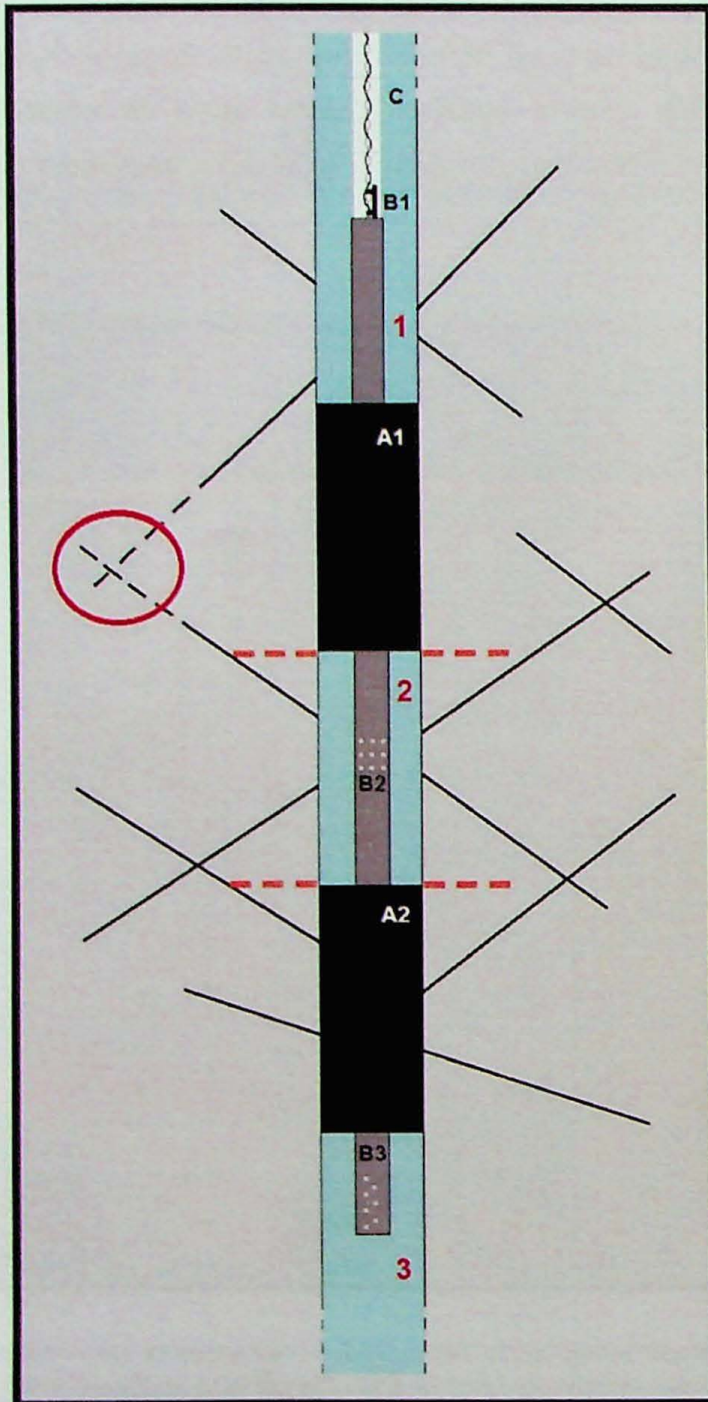


Figura 10: 10.1 – posicionamento da unidade móvel e do tripé; 10.2 – obturadores pneumáticos de diferentes diâmetros; 10.3 – detalhe da conexão selante do tubo de PVC, com O-ring (preto) interno; 10.4 – tubo de PVC para fora do poço, configurando a via de comunicação com o intervalo central do sistema.

Durante a descida, a aferição da profundidade é feita em duas etapas. Preliminarmente é utilizado o contador de profundidade do guincho, com um *display* em metros, para posicionar o sistema aproximadamente na profundidade desejada. Em seguida, para posicionar os obturadores de maneira precisa acima e abaixo do intervalo a ser ensaiado, utiliza-se a leitura de pressão dos transdutores. Da pressão medida é descontada a pressão atmosférica e é feita a conversão para metros de coluna de água e, em seguida, soma-se o valor do nível de

água medido no momento. Dessa forma o valor em metros de coluna de água acima do sistema de obturadores, somado ao valor do nível de água medido, resultam na posição exata do transdutor, possibilitando consequentemente saber a profundidade do intervalo entre obturadores com precisão dessimétrica



Os obturadores pneumáticos são longas bexigas, infladas com gás nitrogênio sob pressão, e formam selos em contato com a parede do furo, subdividindo o poço em três zonas hidráulicamente isoladas (**fig. 10**). Cada uma dessas zonas dispõe de um transdutor de pressão que envia dados ao *datalogger* por meio de cabos, possibilitando o monitoramento e registro em tempo real da pressão de cada zona, exibidas em formato de gráfico (pressão medida x tempo) pelo *software* Loggernet.

Figura 11: esquema do sistema de obturadores instalado em poço de aquífero fraturado.

Legenda: 1, 2 e 3 – zonas hidráulicamente distintas; A1 e A2 – obturadores pneumáticos inflados; B1, B2 e B3 – transdutores de pressão (B2 e B3 internos); C – tubo de PVC, corrente de sustentação, tubos alimentadores de nitrogênio para os obturadores e cabos transmissores dos transdutores.

A zona tracejada em laranja, entre o par de obturadores, corresponde ao intervalo ensaiado. O círculo vermelho representa um das possíveis dificuldades enfrentadas na utilização do sistema, quando há comunicação entre as zonas devido à conexão entre as fraturas da formação.

Com os obturadores inflados, o valor da pressão em cada zona estabiliza-se, correspondendo à média da soma das pressões exercidas por todas as fraturas da zona mais a pressão atmosférica. A carga hidráulica do intervalo isolado é calculada a partir da pressão estabilizada, que foi registrada em PSI pelo transdutor. Desse valor de pressão registrada, é descontada a pressão atmosférica e corrigida a variação do volume da coluna de água em função da temperatura da água. O resultado obtido é convertido para metros de coluna de

água, utilizando como referencial uma cota arbitrária. O cálculo também considera a diferença de altura entre os transdutores.

Para garantir que há isolamento hidráulico entre as seções, é realizado um teste com adição de pressão à zona central, por meio da conexão hidráulica estabelecida através dos tubos de PVC, sem que haja variação na leitura dos dois transdutores posicionados nas extremidades. Caso os transdutores das extremidades captem variação, a pressão nos obturadores é aumentada ou o conjunto é reposicionado, com o objetivo de garantir estanqueidade ao intervalo. Após estabilizadas e registradas as pressões, sendo a pressão do transdutor central correspondente à(s) fratura(s) de interesse, pode-se iniciar os ensaios hidráulicos. Nesse momento, a coluna de água dentro do tubo de PVC é relativa à carga hidráulica correspondente à(s) fratura(s) no intervalo central.

4.4.2. Ensaios hidráulicos

Os ensaios *slug/bail* são executados com uma bomba de pressão e vácuo (**fig. 12.1**), acoplada ao topo do tubo de PVC por meio de uma conexão selante com um vácuo monômetro acoplado (**fig. 12.2**). Com essa conexão, são controlados e medidos o vácuo e a pressão imprimidos para a execução dos ensaios *slug* e *bail*, respectivamente. Diminuindo a pressão do ar dentro do tubo de PVC, a coluna de água se eleva proporcionalmente devido à entrada de água proveniente das fraturas ativas, isoladas entre os obturadores. Após o novo nível de água gerado artificialmente estabilizar, a válvula de alívio é aberta e a pressão de ar dentro do tubo de PVC retorna à original. Nesse momento é iniciado o ensaio *slug*, no qual a coluna de água elevada artificialmente retorna gradativamente ao nível original, devido ao retorno da água para as fraturas.



Figura 12: 12.1 – bomba de pressão e vácuo; 12.2 – conexão selante com válvulas para controle da pressão e vácuo manômetro acoplado.

O ensaio *bail* é um ensaio análogo ao *slug* e suas etapas são observadas na **fig. 13**. As variações de pressão dentro do tudo de PVC, causadas pelas mudanças da pressão do ar ou da altura da coluna de água, são medidas pelo transdutor central, e os gráficos gerados com o registros dessas medidas são utilizados na interpretação dos ensaios.

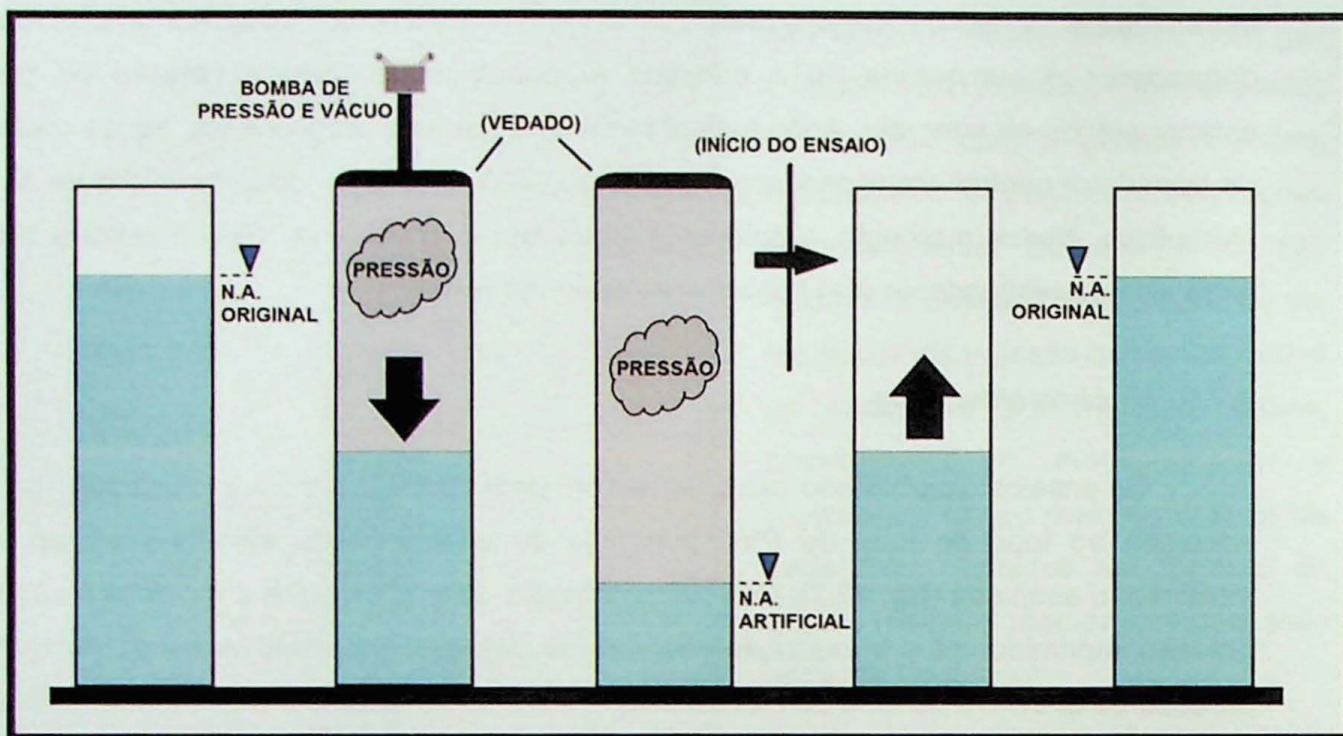


Figura 13: sequência esquemática, da esquerda para direita, das etapas do ensaio *bail* com o uso da bomba de pressão. A cor cinza representa o aumento da pressão de ar gerado pela bomba e as setas representam o deslocamento da coluna de água.

4.5. Tratamento dos dados

Os dados obtidos a partir dos ensaios e registrados pelo *software* Loggernet são exportados no formato de tabela para o programa Excel, no qual são gerados gráficos de pressão por tempo, representativos dos ensaios *slug* e *bail* (**fig. 14**).

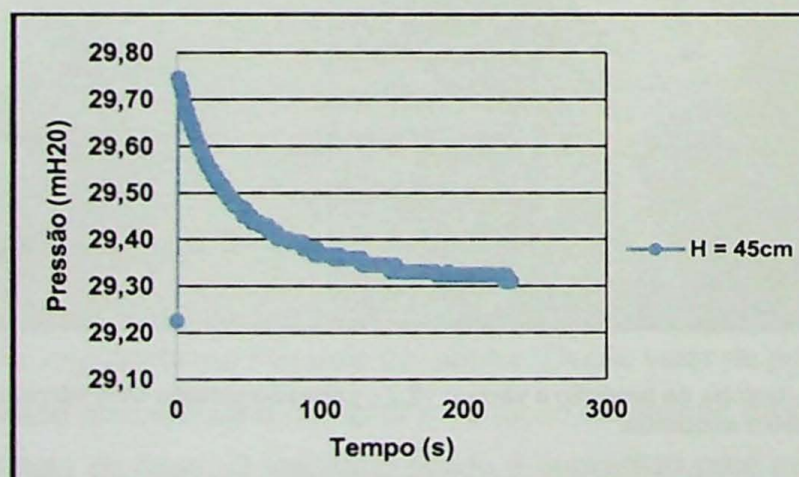


Figura 14: exemplo gráfico de ensaio slug com coluna de água de 45 centímetros.

O programa Excel também é utilizado para gerar gráficos de variação de deslocamento da coluna de água dividido pelo deslocamento inicial do ensaio ($\Delta H/\Delta H_0$) por tempo (fig. 15), utilizados na aplicação do método de Hvorslev (1951).

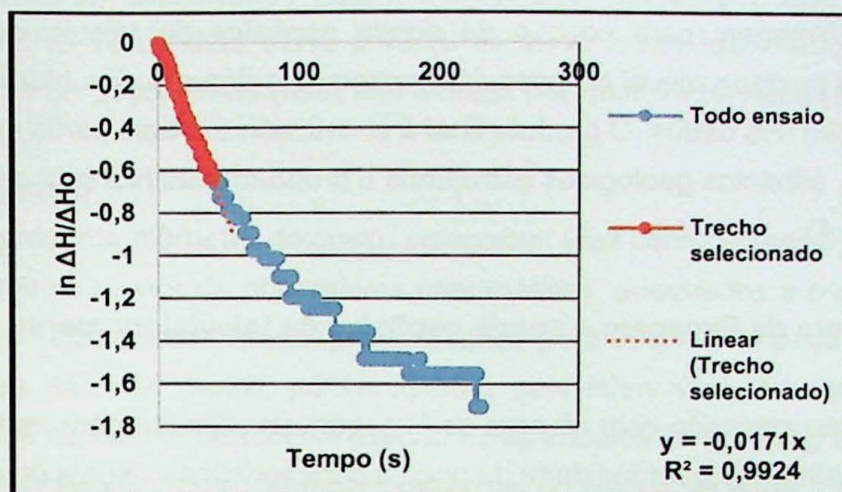


Figura 15: exemplo de gráfico de interpretação de um ensaio *slug* com coluna de água de 45 centímetros, utilizado na aplicação do método Hvorslev para interpretação dos ensaios *slug* e *bail*.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Dois poços foram analisados, seguindo uma linha de trabalho de três etapas para cada poço. Cada etapa é complementar à anterior e requisito para a seguinte: (1) utilização da câmera de filmagem para poço e da sonda geofísica de televisionamento acústico; (2) operação da unidade móvel de pesquisa e execução dos ensaios hidráulicos; (3) tratamento e interpretação dos dados. O produto final é sintetizado em dois perfis que integram os dados construtivos, aspectos geológicos estruturais e propriedades hidráulicas dos poços (**anexo II, fig. 1, 2, 3 e 4**).

5.1. Câmera de filmagem e sonda geofísica de televisionamento acústico

A vídeo inspeção com câmera de filmagem foi utilizada para verificar a integridade do tubo de revestimento, profundidade do poço e características visuais do maciço rochoso e das fraturas. Em nenhum dos poços foram observados indícios de vazamento, manchas de escorrimento ou precipitação nos tubos de revestimento ou nos contatos do revestimento com a rocha. Devido à turbidez da água na porção mais profunda dos poços, o equipamento foi descido a um limite de alguns metros antes do final dos furos. Apenas no poço PP-01 (IGc) foram registradas algumas zonas de afunilamento decorrentes do processo de perfuração, mas não houve problema durante a utilização das demais ferramentas.

A sonda de televisionamento acústico gerou para cada poço um perfil de sua parede interna, no qual são indicados o diâmetro do furo, as rugosidades, as estruturas e as descontinuidades da rocha (**anexo II, fig. 1, 2, 3 e 4**). Os perfis estão orientados em relação ao norte real e contém marcação de profundidade, o que permitiu a localização das fraturas ensaiadas na etapa seguinte. A seleção das fraturas para ensaio foi feita visualmente, buscando preferencialmente as fraturas aparentemente mais abertas e não preenchidas.

Poço MP-01 (Ergomat)

No poço MP-01 (Ergomat) foi observada uma rocha gnáissica, com porções mais bandadas até 35 metros. O contato revestimento/rocha está a 16 metros de profundidade a partir da boca do poço, e foi observada maior incidência de fraturas entre os intervalos 22 a 25 metros e 40 a 55 metros.

Poço PP-01 (IGc)

No poço PP-01 (IGc) foi observada uma rocha granítica com megacristais e, nas porções mais profundas, veios de um mineral claro. O contato do tubo de revestimento com a rocha foi identificado a profundidade de 87 metros, a partir de onde são observadas algumas fraturas de menor espessura, presentes por toda a extensão do furo. Fraturas de maior abertura não preenchidas foram localizadas a 90,0 metros; 132,0 metros; 141,0 metros; 223,0 metros; 228,5 metros; 241,0 metros; 248,0 metros; 255,0 metros, e uma zona muito fraturada de 201,0 a 204,0 metros.

5.2. Unidade móvel de pesquisa e ensaios hidráulicos

Os trabalhos no poço MP-01 (Ergomat) foram realizados entre os dias 18/02 e 03/03 de 2016, no qual foram executados vinte e sete ensaios hidráulicos distribuídos por seis intervalos (**tab. 3**). Entre os dias 07/10 a 15/10 de 2016 foram executados vinte e quatro ensaios hidráulicos no poço PP-01 (IGc), distribuídos por quatro intervalos (**tab. 4**).

Poço MP-01 (Ergomat)

O poço apresenta diâmetro de quatro polegadas (dez centímetros) e para sua análise foi utilizado o conjunto menor de obturadores pneumáticos, adequados a poços de até cinco polegadas. Foram selecionadas quinze profundidades para ensaios no poço, com o intervalo entre obturadores de 1,57 metro, porém apenas seis intervalos apresentaram resposta hidráulica, exibidos na **tab. 3**. Buscou-se executar três ensaios do tipo *slug* e três ensaios do tipo *bail* para cada intervalo, com diferentes variações de coluna de água, representados em vinte e sete gráficos (**anexo III**). Durante os ensaios também foi registrada a carga hidráulica estabilizada para cada intervalo.

Intervalos selecionado	Ensaio executados
24 - 25,5 m	Bail 60 cm Bail 65 cm Bail 85 cm
	Slug 25 cm Slug 35 cm Slug 45 cm
38,5 - 40 m	Bail 30 cm Bail 185 cm
	Slug 180 cm
40 - 41,5 m	Bail 30 cm Bail 35 cm Bail 70 cm
44 - 45,5 m	Bail 20 cm Bail 40 cm Bail 40 cm Bail 70 cm
	Slug 20 cm Slug 50 cm Slug 75 cm
46,5 - 48 m	Bail 35 cm Bail 40 cm Bail 65 cm
	Slug 35 cm Slug 50 cm Slug 55 cm
54,5 - 56 m	Bail 110 cm
	Slug 150 cm

Tabela 3: ensaios executados para intervalos do poço MP-01 (Ergomat).

Poço PP-01 (IGc)

O poço apresenta diâmetro de seis polegadas (quinze centímetros) e para sua análise foi utilizado o conjunto maior de obturadores, adequados a poços de cinco a nove polegadas. Foram selecionadas cinco profundidades para ensaios no poço, com o intervalo entre obturadores de 2,42 metros, porém apenas quatro intervalos apresentaram resposta hidráulica, exibidos na **tab. 4**. Buscou-se executar três ensaios do tipo *slug* e três ensaios do tipo *bail* para cada intervalo, com diferentes variações de coluna de água, representados em vinte quatro gráficos (**anexo III**). Durante os ensaios também foi registrada a carga hidráulica estabilizada para cada intervalo.

Intervalos selecionado	Ensaio executados
202 - 204 m	Bail 30 cm Bail 30 cm Bail 35 cm
	Slug 20 cm Slug 35 cm Slug 40 cm
227 - 229 m	Bail 30 cm Bail 35 cm Bail 85 cm
	Slug 40 cm Slug 80 cm
241 - 243 m	Bail 30 cm Bail 40 cm Bail 50 cm Bail 70 cm
	Slug 20 cm Slug 35 cm Slug 40 cm
247 - 249 m	Bail 30 cm Bail 40 cm Bail 70 cm
	Slug 40 cm Slug 50 cm Slug 70 cm

Tabela 4: ensaios executados para intervalos do poço PP-01 (IGc).

5.3. Resultados obtidos com o tratamento dos dados

Poço MP-01 (Ergomat)

Para os seis intervalos que apresentaram resposta hidráulica, foram gerados vinte e sete gráficos para interpretação (**anexo III**), um para cada ensaio executado, a partir dos quais foi calculado um valor de transmissividade (T) para cada ensaio *bail* e *slug*. Os valores de transmissividade gerados para cada ensaio e os valores de transmissividade estabelecidos para os intervalos estão na tabela a seguir:

Intervalo	Ensaio	T (m ² /s)	Média T (m ² /s)
24 - 25,5 m	Bail 60 cm	4,38E-05	4,20E-05
	Bail 65 cm	4,22E-05	
	Bail 85 cm	4,38E-05	
	Slug 25 cm	3,40E-05	
	Slug 35 cm	5,29E-05	
	Slug 45 cm	3,52E-05	
38,5 - 40 m	Bail 30 cm	3,15E-03	1,75E-03
	Bail 185 cm	1,69E-03	
	Slug 180 cm	1,81E-03	
40 - 41,5 m	Bail 30 cm	4,14E-05	3,90E-05
	Bail 35 cm	3,93E-05	
	Bail 70 cm	3,64E-05	
	Bail 20 cm	5,37E-04	
44 - 45,5 m	Bail 40 cm	2,31E-04	2,34E-04
	Bail 2 40 cm	2,28E-04	
	Bail 70 cm	2,19E-04	
	Slug 20 cm	2,79E-04	
	Slug 50 cm	2,27E-04	
	Slug 75 cm	2,22E-04	
46,5 - 48 m	Bail 35 cm	3,91E-05	3,61E-05
	Bail 40 cm	2,51E-05	
	Bail 65 cm	2,66E-05	
	Slug 35 cm	4,53E-05	
	Slug 50 cm	3,89E-05	
	Slug 55 cm	4,18E-05	
54,5 - 56 m	Bail 110 cm	1,99E-04	1,84E-04
	Slug 150 cm	1,68E-04	

Tabela 5: valor de transmissividade (T) para cada ensaio e para cada intervalo do poço MP-01 (Ergomat). Apenas os valores em azul foram considerados para calcular a média de transmissividade dos ensaios.

Poço PP-01 (IGc)

Para os quatro intervalos que apresentaram resposta hidráulica, foram gerados vinte e quatro gráficos para interpretação (**anexo III**), um para cada ensaio executado, a partir dos quais foi calculado um valor de transmissividade (T) para cada ensaio *bail* e *slug*. Os valores de transmissividade gerados para cada ensaio e os valores de transmissividade estabelecidos para os intervalos estão na tabela abaixo:

Intervalo	Ensaio	T (m ² /s)	Média T (m ² /s)
202 - 204 m	Bail 30 cm	7,46E-06	7,91E-06
	Bail 2 30 cm	8,06E-06	
	Bail 35 cm	6,75E-06	
	Slug 20 cm	1,37E-05	
	Slug 35 cm	8,53E-06	
	Slug 40 cm	8,77E-06	
228 - 229 m	Bail 30 cm	1,74E-05	1,43E-05
	Bail 35 cm	1,43E-05	
	Bail 85 cm	8,65E-06	
	Slug 40 cm	1,37E-05	
	Slug 80 cm	1,18E-05	
241 - 243 m	Bail 30 cm	8,06E-06	8,86E-06
	Bail 40 cm	1,08E-05	
	Bail 50 cm	8,77E-06	
	Bail 70 cm	9,12E-06	
	Slug 20 cm	1,16E-05	
	Slug 35 cm	9,48E-06	
	Slug 40 cm	1,37E-05	
247 - 249 m	Bail 30 cm	1,64E-05	1,63E-05
	Bail 40 cm	1,67E-05	
	Bail 70 cm	1,55E-05	
	Slug 40 cm	1,78E-05	
	Slug 50 cm	1,62E-05	
	Slug 70 cm	1,50E-05	

Tabela 6: valor de transmissividade (T) para cada ensaio e para cada intervalo do poço PP-01 (IGc). Apenas os valores em azul foram considerados para calcular a média de transmissividade dos ensaios.

6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1. Câmera de filmagem e sonda geofísica de televisionamento acústico

A câmera de filmagem para poço fez o registro da profundidade, entretanto foi observada diferença de quase quatro metros em relação a profundidade das imagens obtidas com a sonda de televisionamento acústico. Esta diferença ocorreu devido à maneira como cada um dos equipamentos registra a profundidade. No caso da câmera, o contador fica localizado na ponta da haste e está sujeito a um erro maior por rodar em falso em situações de perda de tensão no cabo.

Não houve dificuldade na operação da sonda geofísica de televisionamento acústico, sendo importante manter uma baixa velocidade de subida (um a dois metros por minuto) para o registro de imagens com alta resolução. A partir dos perfis gerados foi possível inferir interpretações acerca da atitude das fraturas que interseccionam os poços:

Poço MP-01 (Ergomat)

Para o poço MP-01 (Ergomat) foi gerado um estereograma a partir das direções e dos mergulhos das fraturas analisadas:

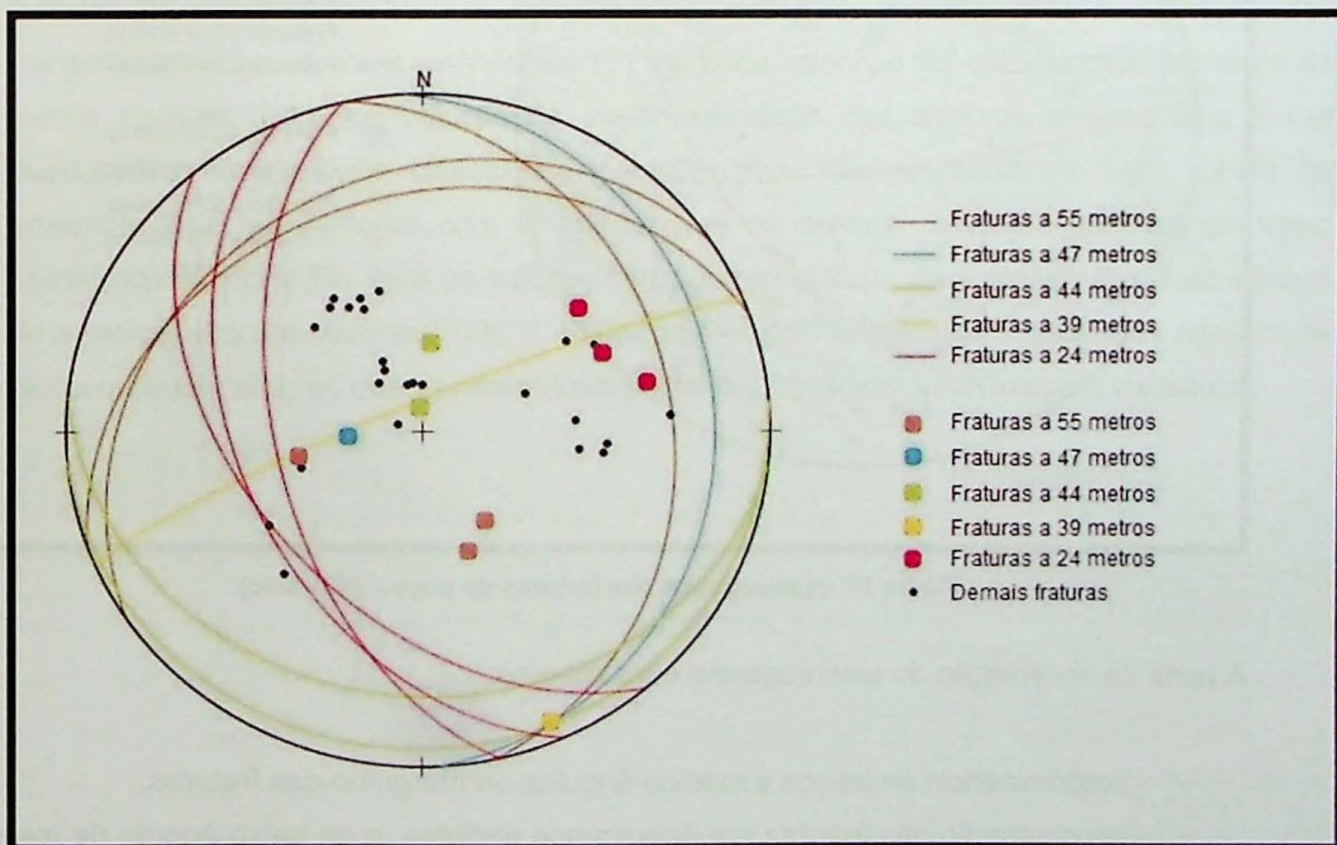


Figura 16: estereograma das fraturas do poço MP-01 (Ergomat).

A partir da observação do estereograma constatou-se:

- predominância de baixo a médio ângulo de mergulho das fraturas;
- atitudes semelhantes para fraturas ensaiadas na mesma profundidade;
- aparente existência de dois grupos de fraturas, um com mergulho baixo a médio para S-SE e outro com mergulho médio para W-SW;
- mergulho relativamente alto da fratura a 39 metros (amarelo), com o maior valor de transmissividade ($3,9E-05 \text{ m}^2/\text{s}$), destacando-se das demais atitudes.

Poço PP-01 (IGc)

Para o poço PP-01 (IGc) foi gerado um estereograma a partir das direções e dos mergulhos das fraturas analisadas:

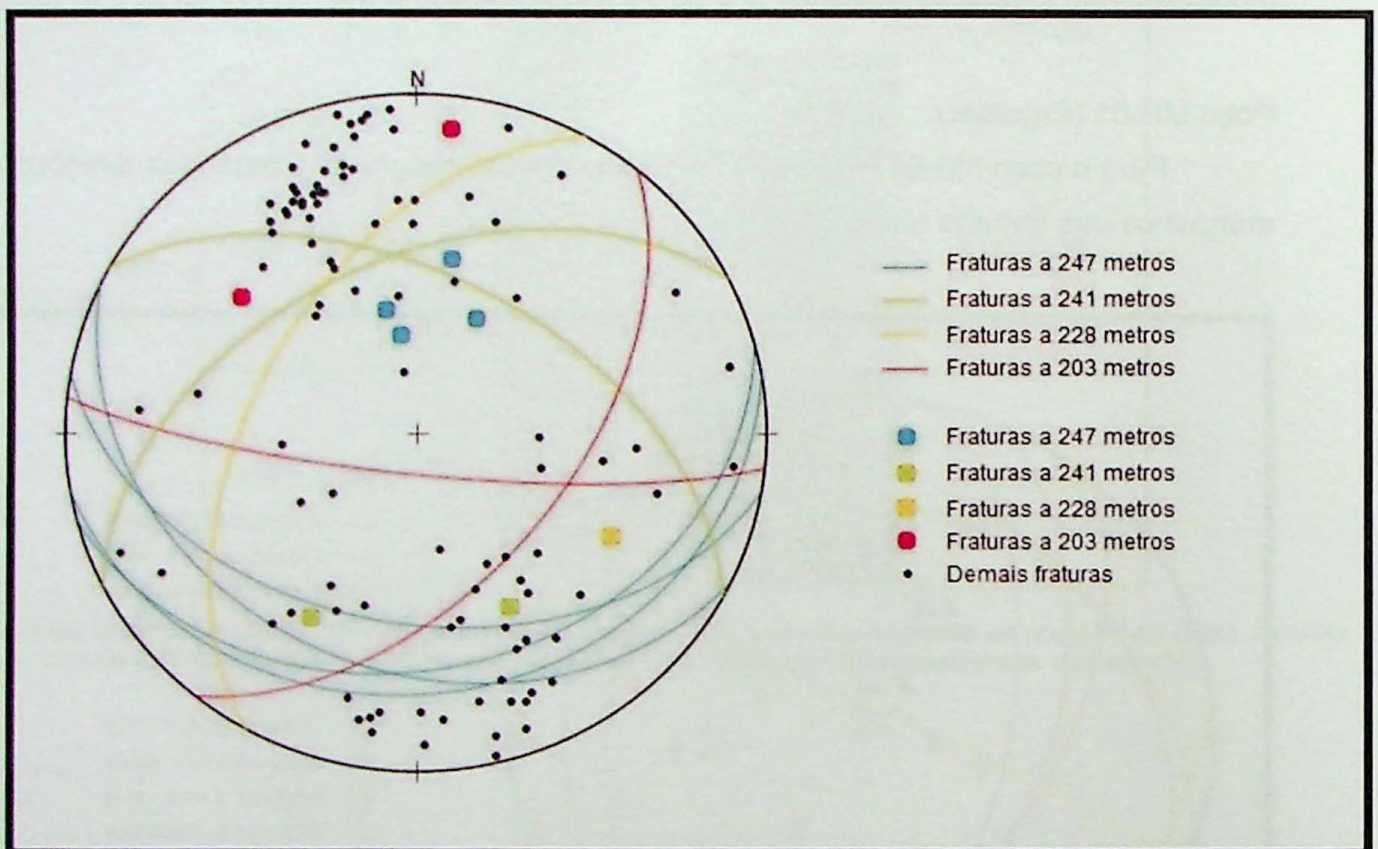


Figura 17: estereograma das fraturas do poço PP-01 (IGc).

A partir da observação do estereograma constatou-se:

- predominância de baixos a médios ângulos de mergulho das fraturas;
- concentração das fraturas em dois grupos distintos, o de baixo ângulo de mergulho para S-SE e o de baixo ângulo de mergulho para N-NW.

6.2. Operação da unidade móvel de pesquisa e ensaios hidráulicos

Por ser uma ferramenta de desenvolvimento recente, a utilização da unidade móvel ainda é suscetível a falhas e, consequentemente, descobertas de possíveis melhorias. Entre as diversas dificuldades, a de maior relevância para o presente trabalho foi a baixa frequência de registro de dados dos transdutores de pressão. No poço MP-01 (Ergomat) o intervalo de registro de dados dos transdutores foi de seis segundos, e no poço PP-01 (IGc) de quatro segundos, o que gerou lacunas relativamente grandes nos dados. Uma maior frequência de registro possibilita a reprodução de gráficos com mais pontos, melhorando consideravelmente o processo de interpretação.

Nos ensaios executados no poço PP-01 (IGc) não foi utilizado o transdutor na zona inferior devido a avarias no equipamento. Os obturadores se mostraram eficientes e no geral não foi comum o registro de comunicação entre as zonas hidráulicas, mas para esse poço não foi possível realizar essa verificação no nível inferior.

6.3. Tratamento e interpretação dos dados

Como explicitado, a baixa frequência de aquisição de dados gerou gráficos com número de pontos relativamente baixo, prejudicando a aplicação do método Hvorslev (1951), o que foi contornado com a seleção dos melhores ensaios para a definição das transmissividades. A transmissividade (T) de cada intervalo foi estabelecida por meio da média simples entre os valores de transmissividade dos diversos ensaios *slug* e *bail* executados no intervalo, descartando ensaios que não reproduziram boas curvas de interpretação, normalmente com R^2 menor que os demais. Buscou-se manter um baixo coeficiente de variação para os valores de transmissividade, descartando para isso valores de ensaios não satisfatórios (**tab. 7 e 8**), como alguns ensaios com coluna de água muito baixa ou muito alta, ou que apresentaram oscilação na pressão medida pelo transdutor.

Poço MP-01 (Ergomat)

Trecho	Ensaio	T (m ² /s)	R ²	M.T. (m ² /s)	D.P.	C.V.	C.H. (m)	G.H.
24m - 25,5m	Bail 60 cm	4,4E-05	0,986	4,20E-05	6,88E-06	0,16	103,31	5,83E-01 (descendente)
	Bail 65 cm	4,2E-05	0,993					
	Bail 85 cm	4,4E-05	0,990					
	Slug 25 cm	3,4E-05	0,958					
	Slug 35 cm	5,3E-05	0,983					
	Slug 45 cm	3,5E-05	0,992					
38,5m - 40m	Bail 30 cm	3,2E-03	0,990	1,75E-03	8,17E-05	0,05	94,86	9,92E-02 (descendente)
	Bail 185 cm	1,7E-03	0,983					
	Slug 180 cm	1,8E-03	0,989					
40m - 41,5m	Bail 30 cm	4,1E-05	0,995	3,90E-05	2,48E-06	0,06	94,71	5,92E-02 (descendente)
	Bail 35 cm	3,9E-05	0,996					
	Bail 70 cm	3,6E-05	0,998					
44m - 45,5m	Bail 20 cm	5,4E-04	0,741	2,34E-04	2,24E-05	0,10	94,47	2,64E-01 (ascendente)
	Bail 40 cm	2,3E-04	0,998					
	Bail 2 40 cm	2,3E-04	0,998					
	Bail 70 cm	2,2E-04	0,999					
	Slug 20 cm	2,8E-04	0,867					
	Slug 50 cm	2,3E-04	0,961					
	Slug 75 cm	2,2E-04	0,984					
46,5m - 48m	Bail 35 cm	3,9E-05	0,929	3,61E-05	8,31E-06	0,23	95,13	9,90E-02 (descendente)
	Bail 40 cm	2,5E-05	0,943					
	Bail 65 cm	2,7E-05	0,960					
	Slug 35 cm	4,5E-05	0,873					
	Slug 50 cm	3,9E-05	0,947					
	Slug 55 cm	4,2E-05	0,964					
54,5m - 56m	Bail 110 cm	2,0E-04	0,978	1,84E-04	2,20E-05	0,12	94,34	
	Slug 150 cm	1,7E-04	0,984					

Tabela 7: ensaios selecionados (em azul) para definir média de transmissividade do intervalo. Foram selecionados os valores que estabeleceram menor Coeficiente de Variação (C.V.).

Legenda: T – transmissividade; M.T. – média das transmissividades; D.P. – desvio padrão; C.H. – carga hidráulica; G.H. – gradiente hidráulico.

A avaliação das cargas hidráulicas medidas indica fluxo majoritariamente descendente, sendo a zona 38,5 a 40 metros a principal contribuinte para entrada de água no poço, por apresentar a maior transmissividade (1,75E-03 m²/s), uma a duas ordens de grandeza superior às demais e a terceira maior carga hidráulica (94,86 m). A maior carga hidráulica (103,31 m) foi medida no intervalo 24 a 25,5 metros, e a segunda maior (95,13 m), no intervalo de 46,5 a 48 metros, porém as baixas transmissividades (4,20E-05 m²/s e 3,61E-05 m²/s respectivamente) não indicam grande contribuição para o fluxo no poço. Os intervalos

44 a 45,5 metros e 54,5 a 56 metros, ambos com transmissividade em torno de $2,2\text{E-}05 \text{ m}^2/\text{s}$, são as principais saídas de água no poço por apresentarem as menores cargas hidráulicas (94,47 m e 94,34 m, respectivamente).

Poço PP-01 (IGc)

Trecho	Ensaio	T (m²/s)	R²	M.T. (m²/s)	D. P.	C.V.	C.H. (m)	G. H.
202m - 204 m	Bail 30 cm	7,46E-06	0,849	7,91E-06	8,18E-07	0,1	86,50	4,88E-02 (descendente)
	Bail 2 30 cm	8,06E-06	0,854					
	Bail 35 cm	6,75E-06	0,911					
	Slug 20 cm	1,37E-05	0,682					
	Slug 35 cm	8,53E-06	0,906					
	Slug 40 cm	8,77E-06	0,936					
228m - 229 m	Bail 30 cm	1,74E-05	0,709	1,43E-05	2,31E-06	0,16	86,31	5,09E-03 (ascendente)
	Bail 35 cm	1,43E-05	0,712					
	Bail 85 cm	8,65E-06	0,906					
	Slug 40 cm	1,37E-05	0,761					
	Slug 80 cm	1,18E-05	0,857					
241m - 243 m	Bail 30 cm	8,06E-06	0,725	8,86E-06	6,07E-07	0,07	86,37	8,34E-03 (descendente)
	Bail 40 cm	1,08E-05	0,841					
	Bail 50 cm	8,77E-06	0,878					
	Bail 70 cm	9,12E-06	0,906					
	Slug 20 cm	1,16E-05	0,669					
	Slug 35 cm	9,48E-06	0,809					
	Slug 40 cm	1,37E-05	0,883					
247m - 249 m	Bail 30 cm	1,64E-05	0,928	1,63E-05	9,50E-07	0,06	86,18	
	Bail 40 cm	1,67E-05	0,909					
	Bail 70 cm	1,55E-05	0,967					
	Slug 40 cm	1,78E-05	0,913					
	Slug 50 cm	1,62E-05	0,937					
	Slug 70 cm	1,50E-05	0,969					

Tabela 8: ensaios selecionados (em azul) para definir média de transmissividade do intervalo. Foram selecionados os valores que estabeleceram menor Coeficiente de Variação (C.V.).

Legenda: T – transmissividade; M.T. – média das transmissividades; D.P. – desvio padrão; C.H. – carga hidráulica; G.H. – gradiente hidráulico.

As transmissividades das fraturas são relativamente baixas, indicando baixo fluxo geral dentro do poço. O fluxo existente é descendente, com duas hipóteses possíveis para sua ocorrência: (1) há dois intervalos com fluxos distintos, ocorrendo entre as duas seções do poço de maior gradiente hidráulico, uma com entrada no intervalo 202 a 204 metros e saída em 227 a 229 metros (gradiente hidráulico de $4,9\text{E-}02$) e outra com entrada em 241 a 243 metros e saída em 247 a 249 metros (gradiente hidráulico de $8,3\text{E-}03$); (2) o fluxo ocorre preferencialmente entre os dois intervalos de maior transmissividade, com entrada em 227 a 229 metros (transmissividade de $1,43\text{E-}05 \text{ m}^2/\text{s}$) e saída em 247 a 249 metros (transmissividade de $1,63\text{E-}05 \text{ m}^2/\text{s}$), com gradiente hidráulico igual a $6,48\text{E-}03$.

7. CONCLUSÃO

A câmera de filmagem se mostrou um equipamento útil para a primeira inspeção em poços, reconhecendo facilmente possíveis anormalidades no revestimento e na parede do poço. Isso é de grande importância no trabalho em poços, evitando que ferramentas caras fiquem presas e/ou sofram avarias. Com seu uso combinado à sonda de televisionamento acústico, a câmera é até certo ponto um substituto viável ao perfilador ótico, no sentido de avaliar a condição das fraturas e sinais de entrada de água no poço e, em alguns casos, permitir a identificação dos litotipos.

A sonda de televisionamento acústico é essencial para a caracterização de aspectos construtivos, como a extensão das porções revestidas e o diâmetro do furo, e para a localização e avaliação de fraturas que interseccionam o poço, essenciais à execução de ensaios hidráulicos em intervalos discretos. Alguns pontos a destacar em relação às ferramentas utilizadas para obtenção e organização das informações visuais são:

- o medidor de profundidade do guincho que opera a sonda de televisionamento acústico é confiável, as profundidades registradas puderam ser utilizadas para orientar o equipamento de ensaios hidráulicos;
- a câmera de filmagem não é um equipamento para perfilagem, seu uso está limitado à inspeção visual;
- o *software* WellCad é de grande utilidade para a conferência e para a organização dos dados obtidos, possibilitando reunir todos as informações e exibi-las de maneira clara.

A unidade móvel de pesquisa para estudos de aquíferos fraturados por meio de poços profundos de abastecimento é uma ferramenta arrojada, de operação complexa e com grande aplicabilidade no atual cenário de estudos ambientais, que carece de métodos e técnicas para a investigação de aquíferos fraturados. O sistema de obturadores pneumáticos utilizado para isolar hidraulicamente intervalos discretos do poço funcionou de maneira eficaz, sendo os transdutores de pressão superior e inferior fundamentais para a confiabilidade dos dados, indicando eventuais comunicações entre as zonas supostamente isoladas hidraulicamente. Pode-se alcançar um maior grau de confiabilidade, aumentando a frequência de registro de dados dos transdutores de pressão.

Os principais aperfeiçoamentos a serem realizados são relativos aos sistemas utilizados na execução e no registro dos ensaios *slug* e *bail*. Os deslocamentos aplicados artificialmente na coluna de água para a execução dos ensaios se repetiram ocasionalmente para um mesmo intervalo, prejudicando a interpretação dos dados obtidos. Entende-se, portanto, que é importante estabelecer procedimentos melhores definidos na operação do equipamento, minimizando imprecisões na obtenção dos dados.

Os ensaios executados revelaram propriedades hidráulicas das fraturas em pequenas porções dos aquíferos estudados, propriedades essas representadas dentro dos poços pelas dinâmicas de fluxo observadas. Para um entendimento mais abrangente da dinâmica de fluxo de um aquífero fraturado, é necessário maior conhecimento estrutural acerca da geometria das fraturas, conjuntamente a ensaios hidráulicos em um número maior de poços próximos. Para essa finalidade, também é indicada a execução de ensaios entre poços, utilizando traçadores ou injeção/bombeamento de água em fraturas específicas, monitorando a resposta obtida nas fraturas dos demais poços próximos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, F.M. (2008). Tectônica rúptil aplicada ao estudo de aquífero em rochas cristalinas fraturadas na região de Cotia. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. 116 p.
- Barbosa, M. B. (2015). Sistema de informações geográficas aplicado ao gerenciamento da contaminação da antiga ZUPI 131, Jurubatuba, São Paulo. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. 138 p.
- Barbosa, M. B. (em preparação). Desenvolvimento de unidade móvel para ensaios hidráulicos e amostragem de água subterrânea em poços. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Barker J. A., Black J. H. (1983). Slug tests in fissured aquifers. *Water Resour Res* 19(6):1558–1564.
- Barton, C. A.; Zoback, M. D.; MOOS, D. (1995). Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology*, 23(8): 683-686.
- Cedergren, H. R. (1967). Seepage, drainage and flow nets, pp. 78-93.
- Chirlin, G. R. (1989). A critique of the Hvorslev method for slug test analysis: The fully penetrating well. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 9(2), 130-138.
- Coutinho, J. M. V. (1980). *Mapa geológico da Região Metropolitana da Grande São Paulo*. Escala 1:100.000. EMPLASA – Empresa Metropolitana de Planejamento da Grande São Paulo S/A. São Paulo.
- Domenico, P. & Schwartz, F. 1990. Physical and chemical hydrogeology. John Wiley & Sons, Nova York, 824 p.
- Fernandes, A. J. (1991). Complexo Embu no leste do Estado de São Paulo: contribuição ao conhecimento da litoestratigrafia e da evolução estrutural e metamórfica. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Fernandes, A. J., Maldaner, C. H. e Rouleau, A. (2011). Análise das fraturas nos basaltos de Ribeirão Preto, SP: aplicação à elaboração de modelo hidrogeológico conceitual. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. *Série Científica*, 11(3), 43-64.
- Fetter, C. W. (1988). Applied Hydrogeology. 2-nd. *Merrill*.
- Fiume, B. (2013). Geologia de detalhe para elaboração de modelo conceitual de circulação de água subterrânea: estudo de caso em Jurubatuba, SP. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. 165 p.
- Freeze, R. A. & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater* (No. 629.1 F7).
- Fundação de Apoio a Universidade de São Paulo (FUSP) (2002). Plano de Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. Caderno Técnico Institucional. São Paulo. Universidade de São Paulo.
- Hasui, Y. (1994). Geologia estrutural das rochas da Linha 4: avaliação e síntese dos conhecimentos. Relatório interno da Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô-SP. São Paulo, 27 p.
- Hvorslev, M. J. (1951). Time lag and soil permeability in ground-water observation. *Waterways Exper. Sta., Corps of Engrs, U.S. Army. Vicksburg, Mississippi*. pp. 1-50.

- Johnson, C. D., Haeni, F. P., Lane Jr., J. W., and White, E. A. (2002). Borehole-Geophysical Investigation of the University of Connecticut Landfill, Storrs, Connecticut, United States Geological Survey Water Resources Investigation Report 01-4033, 187 p.
- Johnson C. A., Joesten P. K., Modazzi R. A. (2005). Borehole-Geophysical and Hydraulic Investigation of the Fractured-Rock Aquifer Near the University of Connecticut Landfill, Storrs, Connecticut, 2000 to 2001, United States Geological Survey Water Resources Investigation Report 03-4125, 133 p.
- L'Apicciarella, E. S. P. (2009). Contaminação e áreas de restrição de uso de água subterrânea no entorno do canal Jurubatuba em São Paulo-SP. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. 125 p.
- Lambe, T. W. & Whitman, R. V. (1969). Soil Mechanics, 553 pp.
- Lee, J. & Lee, K. (1999). Analysis of the quality of parameter estimates from repeated pumping and slug tests in a fractured porous aquifer system in Wonju, Korea. *Ground Water* 37(5):692–700.
- Meyer, J. R., Parker, B. L., Cherry, J. A. (2008). Detailed hydraulic head profiles as essential data for defining hydrogeologic units in layered fractured sedimentary rock. *Environ Geol*, 56:27–44.
- Meyer, J. R., Parker, B. L., Cherry, J. A. (2014). Characteristics of high resolution hydraulic head profiles and vertical gradients in fractured sedimentary rocks. *Journal of Hydrogeology*, 517:493–507.
- Monteiro, D. M., Gurgueira, M. D., Rocha, H. C. (2012). Geologia da região metropolitana de São Paulo. Seminário Twin Cities.
- Morin, R. H.; Carleton, G. B.; Poirier, S. (1997). Fractured-aquifer hydrogeology from geophysical logs; The Passaic Formation, New Jersey. *Ground Water*, 35(2): 328-338.
- Morin, R. H.; Carleton, G. B.; Poirier, S. (2000). Fractured-aquifer hydrogeology from geophysical logs: Brunswick Group and Lockatong Formation, Pennsylvania. *Ground Water*, 38(2): 182-192.
- Novakowski, K. (1995). Groundwater flow in fractured rocks. Waterloo Centre for Ground Water Research, Course Notes, 46 p.
- O'leary, D. W., Friedman, J. D., & Pohn, H. A. (1976). Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. *Geological Society of America Bulletin*, 87(10), 1463-1469.
- Paillet, F. L. (1995). Using borehole flow logging to optimize hydraulic-test procedures in heterogeneous fractured aquifers. *Hydrogeology Journal*, 3: 4-20.
- Paillet, F. L. & Ollila, P. (1994). Identification, characterization and analysis of hydraulic conductive fractures of granitic basement rocks, Massachusetts. U.S. Geological Survey, Water Resources Investigation Report 94-4185, 38 p.
- Parker, B. L. (2011). The discrete fracture network approach for investigating contaminated sites on fractured sedimentary rock. School of Engineering, University of Guelph, Guelph-Ontario. *Geohydro*.
- Quinn, P., Cherry, J. A., Parker, B. L. (não publicado). A versatile packer system for high resolution hydraulic testing in fractured rock boreholes. School of Engineering, University of Guelph. Guelph, Ontario.

- Quinn, P., Cherry, J. A., Parker, B. L. (2010). Quantification of non-Darcian flow observed during packer testing in fractured sedimentary rock. School of Engineering, University of Guelph. Guelph, Ontario. *Water Resources Research*, volume 47.
- Quinn, P., Parker, B. L., Cherry, J. A. (2011). Using constant head step tests to determine hydraulic apertures in fractured rock. *Journal of Contaminant Hydrology*, 126:85–99.
- Quinn, P., Cherry, J. A., Parker, B. L. (2012). Hydraulic testing using a versatile straddle packer system for improved transmissivity estimation in fractured-rock boreholes. *Hydrogeology Journal*, volume 20, issue 8, pp 1529-1547.
- Quinn, P., Parker, B. L., Cherry, J. A. (2013). Validation of non-Darcian flow effects in slug tests conducted in fractured rock boreholes. *Journal of Hydrology*, 486:505–518.
- Quinn, P., Cherry, J. A., Parker, B. L. (2015). Combined use of straddle packer testing and FLUTE profiling for hydraulic testing in fractured rock boreholes. *Journal of Hydrology*, 524:439–454.
- Ribeiro, L. A. F. S. (2012). Perfilagens geofísicas de poços tubulares profundos, região do canal Jurubatuba, São Paulo (SP). Trabalho de Formatura. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. 132 p.
- Riccomini, C. (1989). O Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. 256 p.
- Riccomini, C. & Coimbra, A. M. (1992). Geologia da Bacia Sedimentar. In: Negro Junior, A., Ferreira, A.A., Alonso, U.R., Luz, P.A.C. (eds.). Solos da cidade de São Paulo. ABMS/ABEF. P. 37-94.
- Schwartz, F. W. (1975) Response of testing piezometers in fractured porous media. *Can Geotech J* 12:408–412.
- Schweisinger T., Svenson E. J., Murdoch L. C. (2009). Introduction to hydromechanical well tests in fractured rock aquifers. *Ground Water* 47(1):69–79.
- Shapiro, A. M., Hsieh P. A. (1998). How good are estimates of transmissivity from slug tests in fractured rock? *Ground Water* 36(1):37–48.
- Snow, D. T. (1968). Rock fracture spacings, openings, and porosities. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, 94: 73–91.
- Svenson E., Schweisinger T., Murdoch L. C. (2007). Analysis of the hydromechanical behavior of a flat-lying fracture during a slug test. *J Hydrol* 347(1–2):35–47.
- Wahnfried, I. (2010). Modelo conceitual de fluxo do aquífero Serra Geral e do Sistema Aquífero Guarani na região de Ribeirão Preto-SP. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. 135 p.
- Williams J. H., Johnson C. D. (2004). Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 55, Issue 1-2, p. 151-159.

