

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MODELO CONCEITUAL HIDROGEOLÓGICO DE UM CASO DE CONTAMINAÇÃO  
DO AQUÍFERO FRATURADO POR SOLVENTES CLORADOS NA REGIÃO  
METROPOLITANA DE SÃO PAULO**

**Vinicius Augusto do Nascimento**

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Reginaldo Antônio Bertolo

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Recurso Minerais e  
Hidrogeologia do Instituto de Geociências  
para obtenção do título de Mestre em  
Ciências

Área de Concentração: Hidrogeologia e  
Meio Ambiente

SÃO PAULO

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP

Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)  
via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação:  
Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Nascimento, Vinicius Augusto

Modelo conceitual hidrogeológico de um caso de contaminação do aquífero fraturado por solventes clorados na Região Metropolitana de São Paulo / Vinicius Augusto Nascimento; orientador Reginaldo Antônio Bertolo. -- São Paulo, 2023.

83 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia) -- Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2023.

1. Aquífero Fraturado. 2. Modelo Conceitual Hidrogeológico. 3. Áreas Contaminadas. 4. Teste Cross-borehole. I. Bertolo, Reginaldo Antônio, orient. II. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MODELO CONCEITUAL HIDROGEOLÓGICO DE UM CASO DE  
CONTAMINAÇÃO DO AQUÍFERO FRATURADO POR SOLVENTES CLORADOS  
NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO**

**Vinicius Augusto do Nascimento**

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Reginaldo Antônio Bertolo

Dissertação de Mestrado  
**N° 924**

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Reginaldo Antônio Bertolo

Dr. Marcos Bolognini Barbosa

Dr<sup>a</sup>. Juliana Gardenalli de Freitas

SÃO PAULO  
2023

## AGRADECIMENTOS

A todos os professores que cruzaram o meu caminho ao longo desta jornada e contribuíram nessa construção, muito obrigado por cada conhecimento compartilhado e cada novo mundo apresentado. A Prof<sup>a</sup> Suely, que pela sua dedicação ao ensino soube reconhecer meu potencial e me mostrar que através da educação eu poderia crescer, sou profundamente grato. Ao Instituto Social para Motivar, Apoiar e Reconhecer Talentos (ISMART), não possuo palavras de agradecimento, não apenas pelo apoio financeiro, mas por todo o suporte para eu chegar até aqui, e por acima de tudo ter me mostrado o quão vasto é o mundo e minhas possibilidades, por me deixar sonhar.

Ao Prof<sup>o</sup> Reginaldo Bertolo, pela excelente orientação, confiança, conselhos, zelo e pelas trocas de conhecimento e orientações precisas e criteriosas, essenciais ao longo do trabalho, muito obrigado. E que você seja capaz de inspirar muitos outros alunos, com a sua dedicação ao ensino e a ciência.

Aos colegas do Centro de Pesquisas de Águas subterrâneas (CEPAS – USP), muito obrigado pelo apoio, em especial ao Marcos por toda a ajuda durante os trabalhos de campo e nas discussões técnicas. Assim como a todos os funcionários do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP), obrigado por possibilitarem a construção da ciência dentro desta universidade.

A REGEA e as pessoas incríveis que a constroem, muito obrigado por todo o apoio e conhecimento disponibilizado para a construção da minha carreira, assim como por ceder muitos dos dados utilizados nesta pesquisa. A todos os meus colegas do Departamento de Áreas Contaminadas pela troca de conhecimento e pela ajuda durante os últimos anos. Ao Anderson, por ser mais que um chefe, por me escutar e possibilitar o meu crescimento e por cuidar de todos.

Aos meus amigos que compartilharam muitos dos momentos da minha vida: Thatiane (Thatiii), Fernando (Best), Ingrid (Chita) e Carlos. Aos dois últimos muito obrigado pela troca de conhecimento e apoio durante a graduação e a pós-graduação, pela disponibilidade, ajuda e desabafos ao longo deste projeto. A todos vocês, obrigado pela amizade e por fazerem parte da minha vida.

Ao meu amor, Vitória, você me encontrou ao longo desta jornada e me ajudou a suportar meus momentos ruins e tornou meus momentos felizes sublimes. Obrigado

pelo carinho, dedicação e amor, você é mais que especial para mim e para o mundo, espero estar ao seu lado ao longo de todos os meus próximos desafios, te amo.

Por fim, agradeço as pessoas mais importantes da minha vida desde o começo. Ao meu irmão Thiago, pela minha primeira referência nos estudos. A minha sobrinha Alicia, por mostrar como o amor existe de forma única. Ao meu pai Gilmar, por ser o meu maior exemplo de amor e resiliência, que mesmo entre todas as adversidades fez e faz de tudo pela nossa família e que nunca me deixou sair do caminho da educação e dos meus sonhos. E a minha mãe Selma, pelo incessante apoio em todos os momentos, pelas noites sem dormir e por todas as manhãs acordadas bem cedo ao meu lado durante toda a minha caminhada, pela inspiração de pessoa e a minha maior referência de dedicação e amor.

*“Ensinar não é transferir conhecimento, mas criar as possibilidades para a sua própria produção ou a sua construção”*

Paulo Freire

## RESUMO

A construção de um modelo conceitual hidrogeológico bem desenvolvido é fundamental no processo de investigação da contaminação de aquíferos fraturados, sendo também importante em áreas contendo manto de intemperismo, que representa o primeiro reservatório aquífero em conexão hidráulica com o meio de porosidade por fraturas da rocha sã, subjacente. Este trabalho visa contribuir com o desenvolvimento deste tema, apresentando os resultados obtidos em um estudo de caso que utilizou diversas ferramentas de investigação de poços tubulares no aquífero fraturado, como imageadores acústico (ATV) e ótico (OTV), medidores de vazão tipo *heat pulse flowmeter* (HPF) e obturadores. Para isto, dois poços tubulares foram perfilados, provendo dados estruturais para a caracterização do aquífero fraturado, enquanto os dados do HPF e dos obturadores forneceram dados hidráulicos e possibilitaram a definição de trechos para a coleta e análise química de amostras discretas de água subterrânea. Teste de bombeamento e teste hidráulico do tipo *cross-borehole* com o uso do HPF foram realizados para a avaliação das conexões entre os aquíferos e os poços tubulares. Na área dois aquíferos foram identificados: (1) o aquífero do manto de intemperismo, livre, de porosidade intergranular e delgado, situado sobre (2) o aquífero fraturado, de natureza livre a semiconfinado, de porosidade secundária, formado por um granito foliado. No aquífero fraturado quatro grupos de fraturas foram reconhecidos, sendo os Grupos I e II, de direção N60W a N60E e mergulhos inferiores a 40°, os mais importantes para o fluxo. Os testes hidráulicos demonstraram conexão entre o aquífero do manto de intemperismo e o aquífero fraturado pelas fraturas rasas do Grupo I que são mais transmissivas em relação aos demais grupos, transportando o contaminante. Já a conexão entre as fraturas interceptadas pelos poços tubulares ocorre predominantemente pelas fraturas mais profundas (>140 metros de profundidade) do Grupo II, que representam uma segunda zona mais transmissiva, conectando hidráulicamente os poços e possibilitando o transporte dos contaminantes pelo aquífero fraturado. A utilização das ferramentas junto aos resultados obtidos demonstraram a aplicabilidade e a importância da investigação do aquífero fraturado no contexto de gerenciamento de áreas contaminadas e levantam a discussão da extrapolação das observações hidráulicas e estruturais realizadas para outras áreas no contexto do Complexo Embu na Região Metropolitana de São Paulo.

**Palavras-chave:** Aquífero Fraturado, Modelo Conceitual Hidrogeológico, Áreas Contaminadas, Teste *Cross-borehole*

## ABSTRACT

The construction of a well-developed hydrogeological conceptual model is fundamental in the investigation of contaminated fractured aquifers, being also important in areas containing weathering mantle, which represents the first aquifer in hydraulic connection with the fracture porosity of the subjacent unaltered rock. This study aims to contribute to the development of this theme, presenting the results obtained in a case study that used tools to investigate tubular wells in the fractured aquifer, such as acoustic (ATV) and optical (OTV) televiwers, heat pulse flowmeter (HPF) and packers. For this, two tubular wells were investigated, providing structural data for the characterization of the fractured aquifer, while the HPF and packers provided hydraulic data and allowed the definition of intervals for the collection and chemical analysis of discrete groundwater samples. A pumping test and cross-borehole test with HPF were used to evaluate connections between the aquifers and the tubular wells. In the site, two aquifers were identified: (1) the weathering mantle aquifer, unconfined with intergranular porosity and slender, situated over (2) the fractured aquifer, unconfined to semi-confined with secondary porosity supported by a foliated granite. Four groups of fractures were recognized in the fractured aquifer, Group I and II, with directions N60W to N60E and dips below 40°, which are the most important to the flow. The hydraulic tests showed the connection between the aquifers by the shallow fractures of Group I, which are more transmissive to the other groups, transporting the contaminant. The connection between the fractures intercepted by the tubular wells occurs predominantly by deeper fractures (>140 meters deep) of Group II, which represents a second, more transmissive zone, hydraulically connecting the wells and enabling the transport of contaminants through the fractured aquifer. The use of the tools together with their results demonstrated the applicability and importance of investigating the fractured aquifer in the context of contaminated areas management and raised the discussion of the extrapolation of hydraulic and structural observations to other areas in the context of the Embu Complex in the Metropolitan Region of São Paulo.

**Keywords:** Fractured Aquifer, Hydrogeological Conceptual Model, Contaminated Areas, Cross-borehole Test



# SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>iv</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xvi</b>
<b>LISTA DE APÊNDICES.....</b>	<b>xvi</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos .....	4
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1. Compostos Organoclorados.....	5
2.2. Dinâmica de Fluxo em Aquíferos Fraturados .....	8
2.3. Técnicas de Investigação em Aquíferos Fraturados .....	11
2.3.1. Análise de lineamentos .....	12
2.3.2. Perfilagem geofísica.....	13
2.3.3. Ensaio com obturadores.....	17
2.4. Testes Hidráulicos.....	19
2.4.1. Teste <i>cross-borehole</i> com <i>flowmeter</i> .....	19
2.4.2. Teste de Bombeamento em Aquífero Fraturado .....	20
2.5. Modelos Conceituais .....	20
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
3.1. Caracterização do Aquífero do Manto de Intemperismo .....	21
3.2. Análise de Lineamentos .....	25
3.3. Perfilagens Geofísicas.....	26
3.3.1. Filmagem.....	26
3.3.2. Perfilagem ótica.....	28
3.3.3. Perfilagem acústica .....	28
3.3.4. Perfilagem de fluxo.....	30
3.4. Interpretação dos Dados Estruturais e Hidráulicos Obtidos pelas Perfilagens Geofísicas.....	33

3.5. Teste Hidráulico Cross-borehole com HPF.....	35
3.6. Teste Hidráulico e Amostragem Discreta de Água Subterrânea com Obturadores .....	36
3.7. Teste de Bombeamento.....	38
<b>4. ARTIGO CIENTÍFICO .....</b>	<b>40</b>
4.1. Título.....	40
4.2. Resumo .....	40
4.3. Introdução.....	41
4.4. Área de Estudo .....	43
4.4.1. Geologia e hidrogeologia .....	43
4.4.2. Histórico ambiental .....	48
4.5. Métodos .....	50
4.5.1. Análise de Lineamentos.....	50
4.5.2. Perfilagens Ótica (OTV) e Acústica (ATV) .....	50
4.5.3. Interpretação dos dados estruturais.....	51
4.5.4. Perfilagens de fluxo com HPF.....	52
4.5.5. Teste hidráulico <i>cross-borehole</i> com HPF .....	52
4.5.6. Teste hidráulico com obturadores.....	53
4.5.7. Teste de bombeamento .....	54
4.5.8. Amostragem discreta de água subterrânea com obturadores ....	55
4.6. Resultados.....	55
4.6.1. Poços tubulares avaliados .....	55
4.6.2. Análise estrutural .....	56
4.6.3. Avaliação do fluxo com HPF .....	62
4.6.4. Teste hidráulico <i>cross-borehole</i> .....	62
4.6.5. Teste hidráulico com obturadores.....	63
4.6.6. Teste de bombeamento .....	65
4.6.7. Análises químicas .....	67
4.7. Modelo Conceitual Hidrogeológico .....	67
4.7.1. Incertezas .....	68
4.8. Conclusões .....	71

4.9. Agradecimentos .....	72
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>75</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Caminhos de degradação dos solventes clorados pelas via abiótica e anaeróbica (Fetter, 2008).....	7
Figura 2.2: Mecanismos de propagação de fraturas: I – extensional; II – cisalhamento com deslizamento paralelo à frente de propagação; e III – cisalhamento com deslizamento perpendicular a à frente de propagação (Lawn & Wilshaw, 1993) .....	9
Figura 2.3: Variação da condutividade hidráulica (K) em função da abertura (b) e densidade da fratura (N) (Hoek & Bray, 2005) .....	10
Figura 2.4: Arranjo típico dos equipamentos utilizados na perfilagem geofísica de poços (Hubbard et al., 2008).....	13
Figura 2.5: Representação esquemática da projeção de uma fratura que intercepta o poço em um plano 2D a partir dos dados obtidos pelas sondas ótica e acústica (Paillet & Ollila, 1994).....	15
Figura 2.6: Esquema de funcionamento da sonda HPF, com a indicação do posicionamento da resistência e dos termistores em relação ao fluxo (Keys, 1990).....	17
Figura 2.7: Quatro tipos principais de ensaios hidráulicos realizados com obturadores, seus resultados típicos, interpretações, aplicação em relação a carga e fluxo e vantagem (Quinn et al., 2012).....	18
Figura 3.1: Localização das sondagens realizadas na área de estudo ao longo de todo o seu gerenciamento ambiental, com a indicação das sondagens realizadas por meio de trado manual e as realizadas mecanicamente pelo método de <i>direct push</i> com <i>piston sampler</i> . .....	22
Figura 3.2: Métodos de sondagem empregados na área de estudo. (a) Sondagem por trado manual: (a.1) arranjo do equipamento para sondagem manual; (a.2) amostra deformada do solo de alteração de rocha coletada por trado manual; (a.3) amostra deformada do solo da rocha alterada mole coletada por trado manual. (b) Sondagem mecanizada: (b.1) arranjo do equipamento para sondagem por <i>direct push</i> e momento em que o bico do amostrador é acionado; (b.2) bico do amostrador <i>piston sampler</i> , o qual é acionado em superfície para dar início a coleta; (b.3) amostras indeformadas de um perfil de sondagem coletadas em <i>liner</i> por <i>direct push</i> .....	24

- Figura 3.3: Arranjo do equipamento utilizado para a filmagem dos poços tubulares investigados. (a) montagem realizada no poço tubular PT-B; (b) sonda portátil modelo R-Cam 1300XS da Laval Underground Surveys (LUS) (adaptado de LUS, 2022).....27
- Figura 3.4: Exemplos das observações feitas ao longo da filmagens dos poços tubulares PT-A e PT-B. (a) feições litológicas, rocha do poço tubular PT-A; (b) feições construtivas, fundo do poço tubular PT-A; (c) feições estruturais, zona de quebra do poço tubular PT-B.....27
- Figura 3.5: Arranjo utilizado em campo e detalhes das: (a) sonda ótica QL40-OBI-2G da Advanced Logic Technology (ALT), com os acelerômetros e o magnetômetro no corpo da sonda e anel de lâmpadas de LED, a câmera de alta resolução e o refletor hiperbólico em sua ponta (Adaptado de MSI, 2022); (b) sonda acústica QL-40-ABI-2G da ALT com a indicação da localização do sensor acústico (Adaptado de MSI, 2022).....30
- Figura 3.6: Arranjo utilizado para a perfilagem de fluxo. (a) montagem do equipamento no poço tubular PT-B; (b) sonda HPF-2293 da MSI com as dimensões e a indicação das principais peças (Adaptado de MSI, 2022). .....31
- Figura 3.7: Exemplo da funcionalidade do *diverter* em relação ao fluxo (setas vermelhas) no poço tubular. (a) sonda HPF posicionada para o teste com *diverter* instalado, o fluxo converge para o interior da sonda tornando o ensaio efetivo; (b) sonda HPF posicionada para o teste sem o *diverter* instalado, parte do fluxo é perdido pelas laterais da sonda, gerando subamostragem do fluxo. ....32
- Figura 3.8: Exemplo da interpretação gráfica dos dados obtidos pela sonda HPF. Os pontos em vermelho e azul representam os pontos medidos logo acima ou abaixo das fraturas representativas para o fluxo e as linhas a interpretação de fluxo realizada, indicando os trechos com fluxo ascendente ou descendente na coluna de água do poço e os pontos de entrada ou saída de água no poço..34
- Figura 3.9: Exemplo da interpretação gráfica realizada em cada intervalo do ensaio de *cross-borehole*. Os pontos indicam as medições do fluxo realizadas em função do tempo, representando fluxos ascendentes quando positivas e descendentes quando negativas. A primeira modificação no fluxo ambiente inicial representa o tempo de resposta do ensaio, ou seja, o tempo até que a perturbação do poço de injeção gere efeito no poço monitorado. Os maiores valores de fluxo

representam o pulso observado e o patamar inferior ao fim do teste a estabilização do fluxo ambiente. ....	36
Figura 3.10: Arranjo esquemático do sistema utilizado para a realização da amostragem discreta e do ensaio hidráulico de perda d'água sob pressão, ambos com a utilização de obturadores (Barbosa, 2020). ....	37
Figura 3.11: Arranjo dos equipamentos utilizados durante o ensaio de perda d'água sob pressão. (a) montagem dos obturadores no poço tubular, com o obturador superior em destaque; (b) arranjo utilizado durante o teste de perda d'água sob pressão, em destaque a válvula para controle da vazão e aumento de acordo com o estágio do teste e medidor da vazão estipulada.....	38
Figura 4.1: Geologia da RMSP, localização da área de estudo e dos estudos realizados no aquífero fraturado no contexto do Complexo Embu.....	44
Figura 4.2: Unidades geológicas identificadas na área de estudo e sua descrição em relação à geologia, espessura e resistência ao método de sondagem empregado. ....	45
Figura 4.3: Modelos topográficos da superfície da área de estudo (a) e do topo da rocha alterada dura (b). Em (c), a localização da malha de pontos utilizados na construção dos modelos. Ao centro, seções geológicas esquemáticas da área (A-B a O-P), construídas com base nos modelos gerados. ....	47
Figura 4.4: Mapa potenciométrico do aquífero do manto de intemperismo, com a localização das plumas de compostos organoclorados detectadas na área de estudo. Destaca-se a localização dos poços tubulares presentes e utilizados no estudo (PT-A e PT-B) e não utilizado (PT-C) O mapa também inclui a localização e os perfis dos poços de monitoramento rasos acompanhados durante o teste de bombeamento do poço tubular PT-B.....	49
Figura 4.5: Arranjo esquemático do sistema utilizado para a realização da amostragem discreta e do ensaio hidráulico de perda d'água sob pressão, ambos com a utilização de obturadores (Barbosa, 2020).....	54
Figura 4.6: Estereogramas obtidos pela perfilagem acústica e ótica dos poços tubulares PT-A e PT-B. Em cada gráfico, são apresentados: as projeções polares das fraturas observadas com a indicação do agrupamento interpretado nos estereogramas; as direções das fraturas no diagrama de roseta no canto inferior direito; e a frequência dos ângulos de mergulho das fraturas no histograma do canto inferior esquerdo. (a) fraturas com abertura aparente <10	

mm e (b) >10 mm no poço tubular PT-A; (c) fraturas com abertura aparente <10 mm e (d) >10 mm no poço tubular PT-B.....	58
Figura 4.7: Estereograma com a indicação dos grupos de fraturas identificados nos poços tubulares PT-A e PT-B e a unificação dos grupos similares para o aquífero fraturado na região de estudo. E tabela descrevendo os grupos de fratura indicados no estereograma com a direção do plano de fratura e direção e ângulo de seu mergulho. ....	59
Figura 4.8: Lineamentos observados pelo estudo regional com base no Modelo Digital de Elevação (MDE) da região de estudo. (a) incidência de luz no MDE a 45°; (b) incidência de luz no MDE a 315°. A legenda indica o agrupamento realizado para os lineamentos e a distribuição no diagrama de roseta.....	60
Figura 4.9: Resultados dos ensaios realizados com o HPF nos poços tubulares PT-A e PT-B. Para cada poço tubular, as profundidades de realização dos testes em cada condição de fluxo e a interpretação dos resultados obtidos são indicadas (direções de fluxo dentro dos poços tubulares e as zonas de entrada ou saída de água). Ao centro são apresentados os gráficos obtidos durante o teste hidráulico do tipo <i>cross-borehole</i> , com a indicação das mudanças de fluxo geradas pelo teste. ....	64
Figura 4.10: Gráficos de resposta ao teste de bombeamento do poço bombeado (PT-B) e dos poços observados (PT-A, PM-06, PM-25 e PM-26) ao longo do tempo. De cima para baixo: variação da carga hidráulica (CH) e da taxa de bombeamento do poço tubular PT-B; variação da carga hidráulica (CH) do poço tubular PT-A; variação da carga hidráulica (CH) do poço de monitoramento raso PM-06, PM-25 e PM-26. ....	66
Figura 4.11: Modelo conceitual hidrogeológico da área nas quatro condições de fluxo avaliadas com a indicação do fluxo da água subterrânea pelos poços tubulares PT-A e PT-B e pelas fraturas avaliadas, devido a subamostragem das fraturas verticais existe a incerteza do espaçamento entre elas, por conta disto, são indicadas como fraturas inferidas. Da esquerda para a direita: (a) fluxo observado em condição ambiente; (b) fluxo observado em condição induzida pelo bombeamento do poço tubular PT-A (1) e, em momentos distintos, pela injeção do poço tubular PT-B (2); e (c) fluxo observado em condição induzida pelo bombeamento do poço tubular PT-A a vazão de 500 L/min. ....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Propriedades físicas dos compostos organoclorados de interesse (Adaptado de Fanti, 2015).....	5
Tabela 4.1: Descrição dos grupos de fraturas identificados por Alves (2008), Fernandes et al (2016) e Pino (2021) em estudos no contexto estrutural do Complexo Embu.....	61
Tabela 4.2: Relação das cargas hidráulicas de intervalos isolados medidos com o auxílio dos obturadores. A superior indica a carga hidráulica acima do obturador superior; a intermediária a carga hidráulica entre os obturadores, ou seja, do intervalo ensaiado; e a inferior a carga hidráulica abaixo do obturador inferior. ....	65

## LISTA DE APÊNDICES

- Apêndice A - Perfis dos poços tubulares gerados no *software* WellCad.
- Apêndice B - Dados estruturais brutos obtidos pelas perfilagens geofísicas.
- Apêndice C - Dados brutos dos ensaios hidráulicos realizados com HPF.



## 1. INTRODUÇÃO

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), Brasil, é um território que se tornou intensamente urbanizado e industrializado a partir da década de 1950. Seu processo de industrialização gerou situações ambientais complexas, pois não foi acompanhado por um gerenciamento ambiental apropriado, tanto pela falta de conhecimento técnico quanto pela falta de fiscalização à época. A ausência deste gerenciamento, sobretudo de produtos e efluentes tóxicos (hidrocarbonetos de petróleo e compostos organoclorados), gerou o descarte inapropriado de produtos químicos em solo e água. Conseqüentemente, múltiplas áreas industriais foram contaminadas e se encontram assim, afetando o uso dos aquíferos, que em regiões urbanizadas, são importantes para o abastecimento humano (Hirata et al. 2012, Bertolo et al., 2015, Bertolo, 2017, Barbosa et al., 2017).

Atualmente, de acordo com a legislação do estado de São Paulo, todas as áreas com potencial de contaminação devem passar pelo processo de gerenciamento ambiental para a obtenção de sua licença de operação (CETESB, 2017; 2021). Contudo, apesar desta exigência que inclui diversas áreas no processo de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC), a fiscalização por parte do órgão ambiental é um desafio devido à extensão e a quantidade de empreendimentos na RMSP. Isto possibilita a inércia por parte dos proprietários e causa um desconhecimento de inúmeras áreas contaminadas por parte do Estado, afetando diretamente o gerenciamento do suprimento de água subterrânea para o consumo humano na RMSP.

Outrossim, pelo processo de GAC ser focado na avaliação dos riscos à saúde humana (CETESB, 2017), prioriza-se as investigações voltadas para o aquífero freático raso, que em muitos casos é o primeiro meio de contato do receptor. Assim, em áreas onde não há o consumo de água subterrânea, os níveis aquíferos mais profundos, apesar de sua importância para abastecimento de água regional, são desconsiderados em muitos casos. Este fato ocorre, pois, a Decisão de Diretoria CETESB nº038/2017/C, que rege o processo de GAC, trata genericamente sobre a investigação dos níveis aquíferos mais profundos, ou seja, abre espaço para a interpretação da necessidade de investigação e não estabelece fundamentos a serem exigidos pelo órgão ambiental. Por conta disto, diversos casos são aprovados mesmo

com modelos conceituais que desconsideram o aquífero fraturado quando ele é passível de se encontrar impactado.

Apoiada nesta falta de exigências específicas, a cultura de investigação do meio fraturado não foi gerada, mas este conceito vem mudando. Atualmente as percepções de custos exorbitantes, falta de equipamentos e métodos aplicáveis e ausência de profissionais capacitados no tema vem sendo desmistificadas. O avanço da tecnologia no setor possibilitou o acesso a equipamentos confiáveis e compactos disponíveis em território brasileiro, facilitando a logística e reduzindo os custos de investigação. Ao mesmo tempo, uma série de profissionais se especializaram no tema, levando a discussão dos riscos à saúde humana associados a contaminação do aquífero fraturado para dentro do processo de GAC.

Devido à importância deste tema, diversos estudos vêm sendo conduzidos na RMSP, em especial nos últimos 15 anos, como Alves, 2008; Fernandes et al., 2016; Bertolo, 2017; Fanti et al., 2017; Barbosa et al., 2017; Lojkasek-Lima, 2018; Barbosa, 2020; Fiume et al., 2020; Pino et al., 2021 e Hart et al., 2022. Internacionalmente, o tema é abordado desde o início da década de 1980, com o desenvolvimento de ferramentas e métodos (Paillet et al., 1985; Lau et al., 1987; Morin et al., 1988; Paillet & Ollila, 1994; Lane, 2002; Williams & Paillet, 2002; Francese et al., 2009; Paillet et al., 2012; Busse et al., 2016; Hsu et al., 2019), com destaque para a metodologia DFN-M, de investigação de meios fraturados contaminados (Parker et al., 2012).

Este estudo se encaixa neste contexto, demonstrando que a inclusão dos níveis aquíferos mais profundos e do aquífero fraturado é primordial na construção de modelos conceituais representativos, e que o desenvolvimento contínuo de ferramentas, métodos e conhecimento sobre o tema demonstram cada vez mais que sua aplicação é viável.

Isto posto, o estudo visa descrever um caso de contaminação de aquífero fraturado por compostos organoclorados, através da construção do seu modelo conceitual hidrogeológico. Para tanto, ferramentas de perfilagem foram utilizadas, como os imageadores acústico (*Acoustic Televiewer* - ATV) e ótico (*Optical Televiewer* - OTV) e o medidor de vazão do tipo *flowmeter* (*Heat Pulse Flowmeter* - HPF). Além da aplicação de métodos de interpretação estrutural, testes hidráulicos em um único poço e entre dois poços (*cross-borehole test*) (Paillet, 1993; Williams & Paillet, 2002; Paillet et al., 2012) e da amostragem discreta de água subterrânea com obturadores.

Inserida no contexto industrial da RMSP, no município de Diadema, a área de estudo se situa sobre o Complexo Embu em uma região, que devido às suas características geomorfológicas, possui o embasamento raso, com um manto de intemperismo delgado, formando um aquífero intergranular raso pouco espesso. Devido às suas características de utilização e a presença de contaminação no aquífero freático raso, a área foi inserida no processo de GAC. Ao longo das investigações, foi detectada a presença de compostos organoclorados nos poços tubulares de abastecimento da área, indicando impacto no aquífero fraturado e demonstrando que apenas a investigação do aquífero intergranular seria insuficiente para a construção de um modelo conceitual hidrogeológico sólido

Desta forma, o estudo visou a investigação das condições hidráulicas do aquífero fraturado e de sua conexão com o aquífero do manto de intemperismo na área, demonstrando a importância de sua investigação e de sua inclusão no modelo conceitual hidrogeológico do estudo. Ademais, em um contexto mais amplo, o estudo busca demonstrar a viabilidade e importância da investigação do aquífero fraturado, contribuindo para o entendimento, gerenciamento e evolução das pesquisas sobre a problemática da contaminação da água subterrânea de poços tubulares por compostos organoclorados. Junto a isto, traz a discussão da extrapolação das observações realizadas sobre os principais grupos de fraturas hidráulicamente ativas para outras áreas no contexto estrutural do Complexo Embu na RMSP.

## 1.1. Objetivos

Este estudo visou a elaboração de um modelo conceitual hidrogeológico de um caso de contaminação por compostos organoclorados do aquífero fraturado em uma área industrial na Região Metropolitana de São Paulo. Para tanto, os objetivos específicos foram:

- Caracterizar os aquíferos presentes no que diz respeito às suas características geológicas e hidrogeológicas;
- Caracterizar os principais grupos de fraturas com suas aberturas, direções e mergulhos no aquífero fraturado;
- Caracterizar a dinâmica de fluxo do aquífero fraturado na região e a sua conexão com o aquífero do manto de intemperismo;
- Caracterizar o transporte da contaminação por compostos organoclorados entre os aquíferos;

Ante o exposto, o estudo visa demonstrar a importância e a viabilidade da investigação do aquífero fraturado para a construção de um modelo conceitual hidrogeológicos representativo. E, desta forma, contribuir para o entendimento, o gerenciamento e a evolução das pesquisas sobre a problemática da contaminação da água subterrânea de poços tubulares por compostos organoclorados. Além disto, traz a discussão de uma tendência de orientação das fraturas hidráulicamente ativas dentro do Complexo Embu na RMSP.

A contextualização da área de estudo, metodologia, resultados, discussões e conclusões obtidas pelo estudo são apresentadas no Capítulo 4, no formato de artigo científico a ser submetido.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Compostos Organoclorados

Os compostos organoclorados são hidrocarbonetos com átomos de cloro substituindo um ou mais átomos de hidrogênio em sua estrutura. São usualmente utilizados como desengraxantes e solventes pela indústria, por isso também recebem o nome de solventes clorados. Na área, destacam-se os compostos de interesse apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Propriedades físicas dos compostos organoclorados de interesse (Adaptado de Fanti, 2015).

Parâmetro	Tetracloroetano (PCE)	Tricloroetano (TCE)	Cis-1,2-dicloroetano (Cis-1,2-DCE)	Cloreto de Vinila (CV)	Clorofórmio
Fórmula	C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl	CHCl <sub>3</sub>
Peso molecular (2;4)	165,83	131,39	96,94	62,5	119,4
Densidade a 25°C (g/cm <sup>3</sup> ) (2;3)	1,63	1,46	1,28	0,91	1,49
Ponto de ebulição (°C) (2;3)	121	87	60	-13,7	62
Constante de Henry (atm.m <sup>3</sup> /mol) (2; 4)	0,0153	0,0091	0,0037	2,78	0,00358
Log K <sub>ow</sub> (3)	2,88	2,42	1,86	1,27	1,92
Log K <sub>oc</sub> (1;2)	2,42	1,81	1,93	0,39	1,60
Solubilidade a 25°C (mg/L) (2;4)	150	1100	3500	1100	8000
Pressão de vapor a 25°C (mmHg) (1;2;4)	20	72,6	200	2660	194

Fontes: (1) Fetter, 2008; (2) Pankow & Cherry, 1996; (3) Schwarzenbach, et al., 2005; (4) Suthersan & Payne, 2005.

São incolores e miscíveis em outros solventes orgânicos. Em água são pouco solúveis, levando décadas para a transferência de massa entre a fase livre e dissolvida em água (Anderson et al., 1992). Apresentam menor viscosidade e maior densidade em relação a água, podendo formar fase líquida não aquosa mais densa que a água DNAPL (*Dense Non-Aqueous Phase Liquids*) com grande mobilidade em solo (Fetter, 2001). Possuem altos valores de pressão de vapor e/ou constante de Henry, ou seja, são capazes de se volatilizar para o meio.

Algumas de suas formas são tóxicas, representando riscos à saúde humana e ao meio ambiente tanto na fase líquida quanto na fase gasosa. Devido a sua mobilidade, tem capacidade de atingir grandes áreas.

Em aquíferos porosos migram verticalmente formando bolsões sobre a base do aquífero e/ou camadas menos permeáveis, plumas de fase dissolvida, fase livre, fase adsorvida e vapor na zona não saturada (Kueper et al., 2003).

Já em aquíferos fraturados, quando ocorre o acúmulo do composto no contato com o aquífero poroso, o DNAPL é capaz de migrar pelas fraturas, em condições de pressão favoráveis. Para que o DNAPL consiga entrar pelas fraturas, a sua pressão capilar deve ser maior que a pressão capilar da água na fratura (Fetter, 2001; Kueper et al., 2003). Uma vez no sistema, o DNAPL migra verticalmente e horizontalmente a depender das condições de pressão, com preferência pelas fraturas hidráulicamente mais abertas (Fetter, 2001). Também pode ocorrer a difusão molecular do composto para os poros da matriz rochosa, aprisionando a contaminação. Assim como a fase adsorvida, a fase livre da origem à fase dissolvida, devido a sua dissolução gradual.

A fase livre aprisionada nos poros tem relação direta com a quantidade de poros presente na matriz e a sua conectividade. Poros não conectados são responsáveis pela formação de glóbulos aprisionados, impossibilitando a migração do composto. Já a fase adsorvida é formada pela aderência do contaminante às partículas do meio geológico. Este processo depende principalmente da presença de matéria orgânica e argilominerais, sendo que a fração orgânica tende a controlar o processo na maioria dos aquíferos (Wiedemeier et al., 1999). Desde forma, o coeficiente de distribuição ( $K_d$ ) dado pela equação a seguir, indica a intensidade de adsorção, ou seja, quanto maior seu valor, maior será a adsorção dos contaminantes e a retardação de sua migração.

$$K_d = K_{oc} \cdot f_{oc}$$

Onde:

$K_{oc}$ : coeficiente de partição normalizado pelo carbono orgânico

$f_{oc}$ : fração de carbono orgânico

A migração dos compostos orgânicos depende de vários fatores, entre eles destaca-se os processos físicos e a degradação. Os processos físicos retardam a migração da pluma e reduzem sua concentração, mas são conservativos, ou seja, conservam sua massa. Estes processos incluem a dispersão (difusão molecular e

mecânica), adsorção e volatilização. Já os processos de degradação levam a uma diminuição de massa do composto pai e a formação de um ou mais compostos filhos.

Os processos destrutivos podem ocorrer na presença de microrganismos (biótico) e em sua ausência (abióticos), em meio aeróbico ou anaeróbico. No caso dos organoclorados presentes na área de interesse, o principal mecanismo de degradação é a decloração redutiva (Fetter, 2008). Ela ocorre de maneira abiótica e biótica em ambientes anaeróbicos. Durante a reação, o solvente clorado atua como acceptor de elétrons e o átomo de cloro é substituído por um de hidrogênio, causando a redução dos compostos (Wiedemeier *et al.*, 1999). A sequência de reações dos solventes clorados e os produtos pais e filhos são apresentados na Figura 2.1.

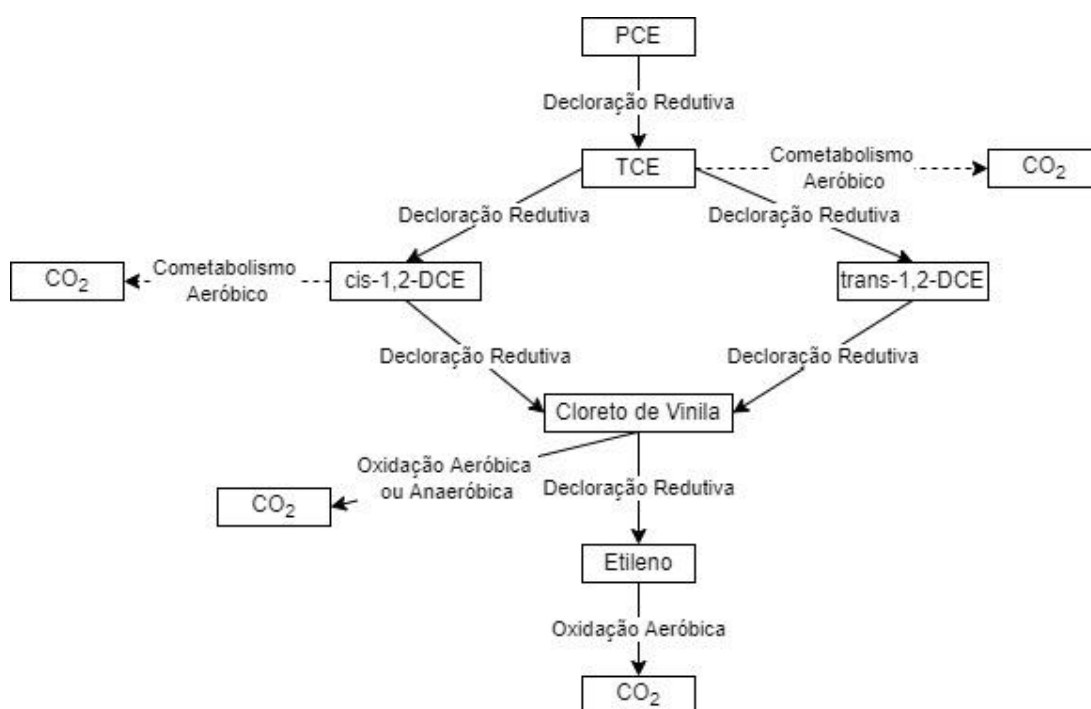


Figura 2.1: Caminhos de degradação dos solventes clorados pelas via abiótica e anaeróbica (Fetter, 2008).

Estas reações privilegiam os compostos mais oxidados, ou seja, com mais moléculas de cloro (PCE e TCE), em ambientes anaeróbicos e com hidrogênio disponível (Wiedemeier *et al.*, 1998). Assim, estes compostos são degradados mais rapidamente em condições anaeróbicas, enquanto os compostos menos clorados tendem a ser menos degradados (Wiedemeier *et al.*, 1998), necessitando de ambientes aeróbicos para sua oxidação.

Desta forma, os ambientes anaeróbicos propiciam a decloração redutiva de PCE e TCE até o DCE, mas geram acúmulo de CV, composto mais tóxico. Isto ocorre devido à falta de oxigênio nos ambientes de formação do CV, gerado no interior de

plumas ou em grandes profundidades, impossibilitando sua oxidação. Quando ocorre a degradação completa, os solventes organoclorados geram produtos inofensivos, como etano, dióxido de carbono, cloretos, metano e água (Fetter, 2001; Wiedemeier *et al.*, 1998; Wiedemeier *et al.*, 1999).

Cada contaminante possui suas propriedades e assim reage de maneira específica em cada meio, sendo sua migração condicionada a esses fatos. No caso dos solventes clorados, como visto, eles podem migrar verticalmente por longas distâncias, causando a contaminação do aquífero fraturado e impactando grandes áreas.

## **2.2. Dinâmica de Fluxo em Aquíferos Fraturados**

As rochas cristalinas (metamórficas e ígneas) formadoras do embasamento possuem baixa porosidade intergranular, sendo consideradas por muito tempo como impermeáveis, com condutividades hidráulicas inferiores a  $10^{-11}$  m/s (Freeze & Cherry, 1979). Contudo, nelas o fluxo da água subterrânea é condicionado pelas fraturas e descontinuidades presentes, formando um aquífero fraturado. Sendo de grande importância para o abastecimento a partir de água subterrânea.

Além disso, as rochas cristalinas também sofrem intemperismo que leva à formação de um manto de alteração. Também chamado de manto de intemperismo, saprólito ou manto inconsolidado, possui espessuras variáveis a depender da exposição da rocha aos agentes intempéricos (Vaz, 1996; Fernandes, 1997; Fanti, 2015, Vaz & Gurgueira, 2017). O manto de intemperismo representa uma importante zona de recarga para o aquífero fraturado, devido às suas condições transicionais entre a porosidade primária e secundária. É uma zona de armazenamento e infiltração de água para o aquífero fraturado, além de uma importante fonte de captação de água para o consumo humano.

Na rocha sã, o armazenamento e fluxo da água subterrânea se dá pelas descontinuidades formadas após a cristalização da rocha, ou seja, através de sua porosidade secundária. O fluxo da água subterrânea nessas descontinuidades é condicionado pelos parâmetros geométricos das fraturas: abertura, conectividade, densidade, rugosidade, preenchimento, atitudes e comprimento (Domenico & Schwartz, 1990)

As fraturas são superfícies nas quais a rocha perde sua coesão e continuidade. São geradas por deformações rúpteis, em níveis crustais rasos, e possuem suas



características determinadas pela magnitude dos esforços principais efetivos, máximo e mínimo ( $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ ) aos quais a rocha é exposta.

A partir desses esforços, as fraturas podem se propagar por três diferentes mecanismos (Figura 2.2): I – extensional, ocorre esforço trativo perpendicular ao plano de fratura, resultando em juntas ou fraturas extensionais; II – cisalhamento, com deslizamento paralelo à frente de propagação, gerando fraturas de cisalhamento; III – cisalhamento, com deslizamento perpendicular à frente de propagação, gerando fraturas de cisalhamento (Lawn & Wilshaw, 1993). A atuação de dois ou mais mecanismos em conjunto podem gerar fraturas híbridas, se propagando de maneira intermediária entre o mecanismo I e o conjunto de mecanismos II e III.

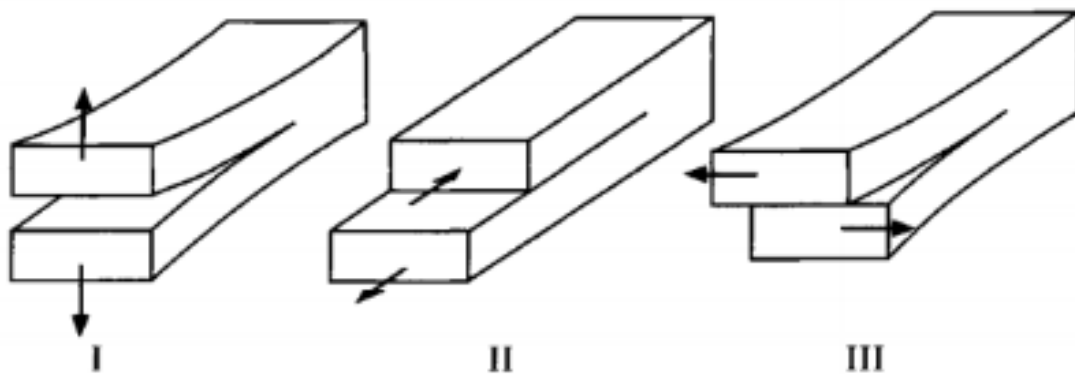


Figura 2.2: Mecanismos de propagação de fraturas: I – extensional; II – cisalhamento com deslizamento paralelo à frente de propagação; e III – cisalhamento com deslizamento perpendicular à frente de propagação (Lawn & Wilshaw, 1993)

Nos aquíferos fraturados, o fluxo em meios contínuos (fluxo laminar e linear) é determinado pela Lei Cúbica, desenvolvida por Snow (1969), em que a condutividade hidráulica ( $K$ ) é dada por:

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

Onde:

$\rho$ : densidade da água ( $\text{kg/m}^3$ )

$g$ : aceleração da gravidade ( $\text{kg/m.s}$ )

$\mu$ : viscosidade da água ( $\text{m/s}^2$ )

$N$ : número de fraturas por unidade de distância

$b$ : abertura das fraturas (m)

De acordo com a Lei Cúbica, a condutividade hidráulica é proporcional ao cubo da abertura das fraturas. Representando o fator mais importante para a determinação

da condutividade hidráulica (Figura 2.3), uma vez que os demais fatores, inclusive a densidade do fraturamento, são apenas lineares.

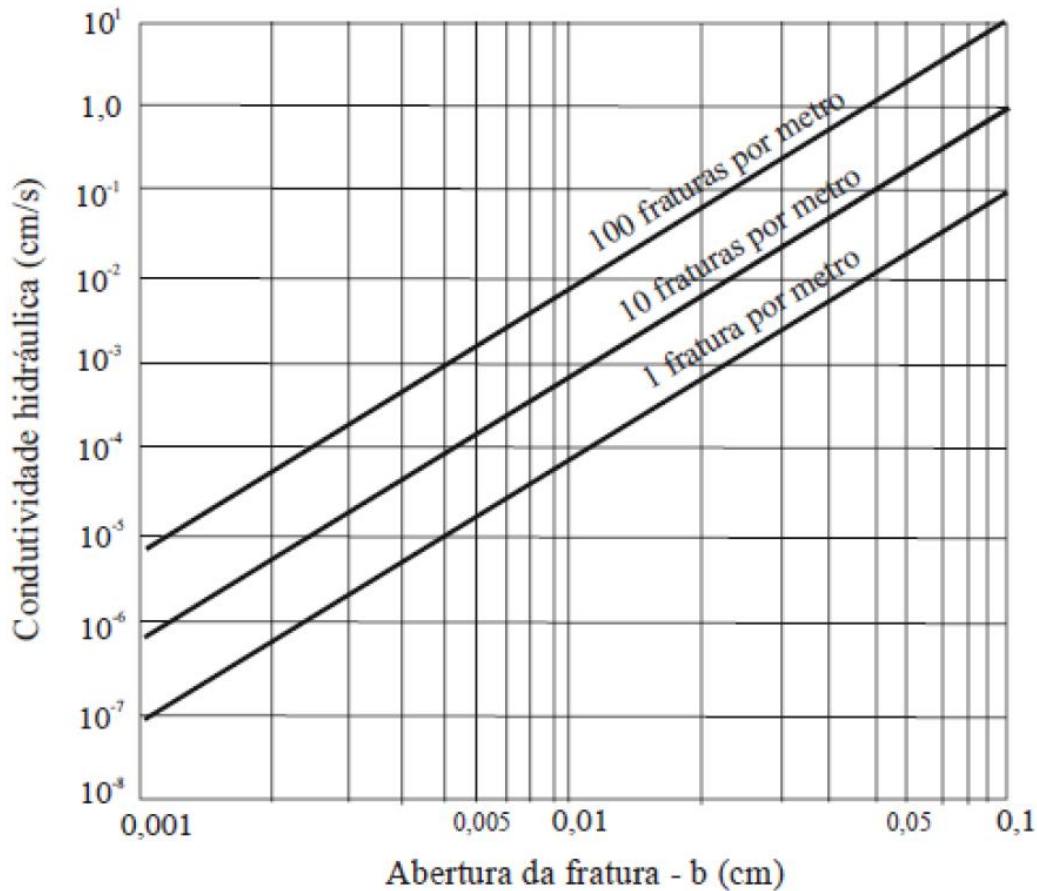


Figura 2.3: Variação da condutividade hidráulica (K) em função da abertura (b) e densidade da fratura (N) (Hoek & Bray, 2005)

Contudo, apesar de sua grande importância para o fluxo da água subterrânea, a abertura das fraturas é dificilmente determinada de forma direta. Assim, sua determinação é baseada em ensaios de transmissividade (T) realizados em intervalos específicos do aquífero e na solução (Markle et al., 1995), derivada da Lei Cúbica, que possibilita determinar a abertura equivalente da fratura, ou seja, a abertura de uma fratura hipotética de paredes lisas e paralelas com transmissividade (T) equivalente a todas as fraturas presentes no intervalo testado:

$$T = \frac{\rho g (2b)^3}{12\mu}$$

Onde:

$\rho$ : densidade da água (kg/m<sup>3</sup>)

$g$ : aceleração da gravidade (kg/m.s)

$\mu$ : viscosidade da água (m/s<sup>2</sup>)

$b$ : abertura das fraturas (m)

A abordagem a ser adotada varia de acordo com o Volume Elementar Representativo (VER), isto é, o mínimo volume de rocha necessário para a definição dos parâmetros hidráulicos que representem o meio fraturado (Bear, 1979; Freeze & Cherry, 1979). Portanto, a depender das características do meio avaliado o VER pode ser impossível de definir. Nestas situações, a hidráulica do fluxo deve ser avaliada por meio da abordagem de meios descontínuos (Fernandes, 2008), através do modelo de abertura equivalente. Desta forma, fora do fluxo laminar e linear, obtém-se medidas de abertura hidráulica das fraturas, e não suas aberturas reais.

### **2.3. Técnicas de Investigação em Aquíferos Fraturados**

A investigação de um aquífero fraturado é complexa e leva em consideração diferentes linhas de evidências para se obter dados confiáveis. Para a compreensão do meio, deve ser levado em consideração as características do contaminante, a geologia, a hidrogeologia e a geomorfologia da área de estudo. Para tanto, a investigação estrutural pode ser realizada através de abordagens diretas e indiretas (Fernandes, 2008).

Atualmente, a investigação de aquífero fraturado é realizada por diversos autores dentro da RMSP (Alves, 2008; Fernandes et al., 2016; Bertolo, 2017; Fanti et al., 2017; Barbosa et al., 2017; Lojkasek-Lima, 2018; Barbosa, 2020; Fiume et al., 2020; Pino et al., 2021 e Hart et al., 2022), usualmente pelo método DFN (*Discrete Fracture Network Approach*) (Parker et al., 2012). A abordagem utilizada por Parker (2012) é destinada ao estudo de solventes clorados em aquífero fraturados sedimentares, contudo, seu conceito pode ser aplicado a qualquer tipo de rocha (Barbosa, 2020). Ela se baseia na realização de atividades em sequência, na junção de diversas linhas de evidência e na escala de trabalho em alta resolução.

A abordagem DFN combina diversas ferramentas, técnicas geofísicas e ensaios hidráulicos discretos, proporcionando dados para a calibração de modelos

numéricos. A abordagem leva a elaboração de modelos conceituais, dando base para a tomada de decisão e o gerenciamento das áreas.

### **2.3.1. Análise de lineamentos**

O método trata-se de uma análise indireta, inicial e regional na investigação de um aquífero fraturado. Os lineamentos podem representar a manifestação das estruturas geológicas em superfície, sejam elas falhas, zonas de cisalhamento, contatos litológicos ou quaisquer outras feições que se manifestem com linhas alongadas marcando o relevo (O'Leary et al., 1976). É um método útil na avaliação da geometria do aquífero fraturado e das principais tendências (*trends*) estruturais regionais (Fernandes & Rudolph, 2001; Pino, 2021; Fiume, 2020).

A análise dos lineamentos é realizada através da interpretação de modelos digitais de terreno (MDE), imagem (arquivo do tipo *raster*) com informações altimétricas do terreno obtida por meio de satélites. As estruturas observadas podem constituir importantes zonas de fluxo de água em subsuperfície, contudo, também podem representar barreiras hidráulicas, a depender do seu mecanismo de propagação (Francese et al., 2009) e, por isso, trata-se de uma análise inicial e não conclusiva.

Sendo assim, a análise de lineamentos é uma fase inicial e importante de investigação do aquífero fraturado, mas que deve ser realizada em conjunto e complementada com outras técnicas, pois nem todo lineamento é uma zona de fluxo de água subterrânea e inclusive para representar uma barreira para ele. Os dados obtidos, como a densidade, conectividade e orientação dos lineamentos somados aos demais dados geológicos podem auxiliar na caracterização das propriedades hidráulicas do aquífero e por conseguinte, contribuir para a elaboração do seu modelo de fluxo (Fernandes, 2008).

### 2.3.2. Perfilagem geofísica

Todos os sistemas que usam de sistema de aquisição de dados próprios (sensores, *data logger* e cabos elétricos e de transmissão de dados) e se deslocam continuamente dentro do meio perfurado podem ser considerados ferramentas de investigação geofísica (Barbosa, 2020). A Figura 2.4 mostra o arranjo típico dessas ferramentas.

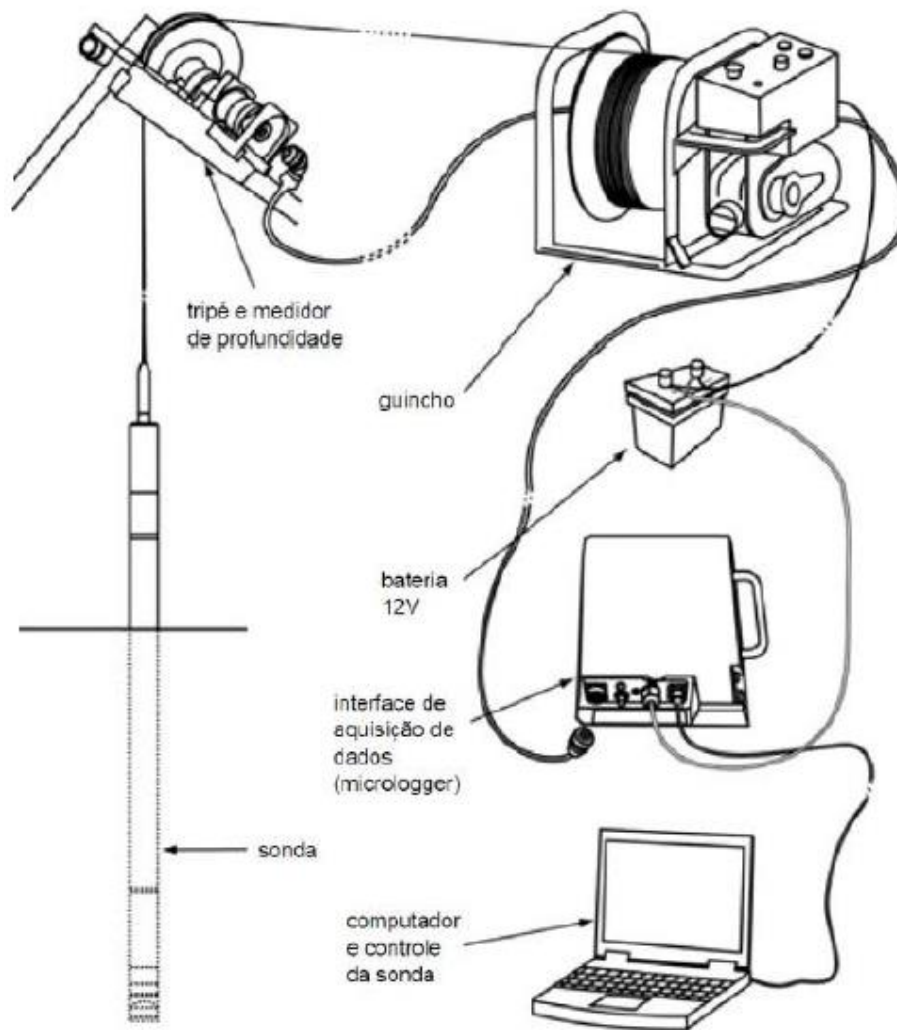


Figura 2.4: Arranjo típico dos equipamentos utilizados na perfilagem geofísica de poços (Hubbard et al., 2008).

Segundo Maliva (2016), estas ferramentas são fundamentais na investigação de aquíferos fraturados, uma vez que fornecem informações detalhadas das características físicas e hidráulicas do meio de forma rápida e com elevado custo-benefício. Sua aplicação é feita geralmente em poços abertos (Collier, 1993) e seus resultados são visualizados em tempo real, permitindo a tomada de decisão durante o uso (Barbosa, 2020).

### 2.3.2.1. *Filmagem*

A filmagem é realizada através de uma câmera de inspeção. Esta câmera consiste em uma sonda com uma ou mais câmeras de vídeo acopladas, de modo a permitir a visualização das laterais e do fundo do poço. Apesar de não permitir uma interpretação estrutural dos dados, devido à ausência de sensores de orientação, as imagens geradas em tempo real permitem a visualização de feições importantes (Barbosa, 2020). As imagens são adquiridas por um operador em superfície que consegue alternar entre a visualização do fundo do poço ou das laterais (com câmeras laterais girando em 360°) durante a descida e a subida da sonda.

O equipamento permite a visualização das características construtivas do poço, das características visuais da rocha e de características hidráulicas como a profundidade do nível d'água, percolação de água acima do nível d'água, presença de fase livre e turbidez na água (Barbosa, 2020). É amplamente utilizado em razão do baixo custo (Maliva, 2016) e por assegurar o conhecimento das condições do poço e a segurança da utilização de equipamentos de perfilagens de maior monta.

### 2.3.2.2. *Perfilagem Ótica (OTV) e Acústica (ATV)*

Na perfilagem ótica (*Optical Televierer* – OTV) são geradas imagens coloridas, contínuas e em alta resolução das paredes do poço, permitindo a caracterização (espessura, mergulho e direção) das estruturas planares que interceptam o poço (Williams & Johnson, 2004). Já a perfilagem acústica (*Acoustic Televierer* – ATV) gera imagens contínuas e em alta resolução através da emissão de ondas ultrassônicas de alta frequência, registro e interpretação do sinal de retorno, amplitude e tempo de trânsito (Keys, 1990).

Ambas as ferramentas são equipadas com acelerômetros e magnetômetro triaxial, permitindo quantificar a inclinação do furo e a orientação para o norte magnético dos dados obtidos. Desta forma, essas ferramentas geram dados orientados, permitindo a sua interpretação estrutural. Estas feições que interceptam o poço são plotadas em um plano 2D, gerando formas sinusoidais, as quais são interpretadas fornecendo a orientação das estruturas (Paillet & Ollila, 1994), como mostra a Figura 2.5.

Especificamente, as sondas OTV são compostas por um anel de LED para iluminação, um refletor hiperbólico e uma câmera para registro das imagens (Barbosa,

2020). Enquanto a sonda ATV possui um mecanismo em que um pulso ultrassônico é emitido por um transdutor e refletido por espelho, que gira em alta velocidade no interior da sonda, em um ângulo de  $90^\circ$  gerando imagens contínuas em  $360^\circ$  (Singhal & Gupta, 2010).

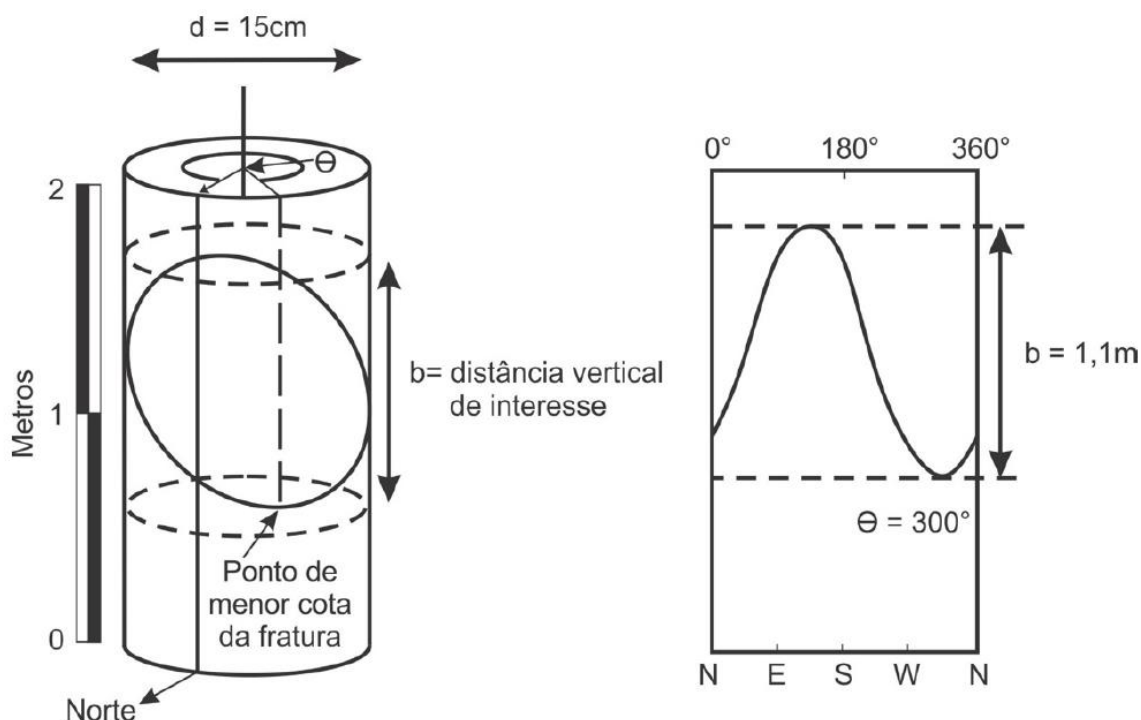


Figura 2.5: Representação esquemática da projeção de uma fratura que intercepta o poço em um plano 2D a partir dos dados obtidos pelas sondas ótica e acústica (Paillet & Ollila, 1994).

A sonda OTV pode ser utilizada dentro e fora da água, sendo sua qualidade de imagem condicionada pelas condições do poço (turbidez da água e limpeza e revestimento das paredes) e da centralização da ferramenta no furo (Barbosa, 2020). Já a ferramenta de ATV precisa estar imersa em fluido para realizar a perfilagem (água ou fluido de perfuração) e segundo Maliva (2016), sua qualidade depende da centralização da ferramenta no furo, da irregularidade das paredes e das características da onda ultrassônica. Ao contrário do OTV, a perfilagem ATV apresenta bons resultados em rochas escuras, água turva e paredes de poços com revestimento não metálico (Williams & Johnson, 2004).

Desta forma, através das perfilagens por OTV e ATV é possível identificar as características construtivas dos poços (posicionamento dos revestimentos, método de sondagem e calibre da perfuração no caso da perfilagem por ATV) e as características da rocha, como litotipos, contatos, estruturas (fraturas, foliações, bandamentos) e suas características (abertura, direção e mergulho, por exemplo). Além disso,

destaca-se que no caso do OTV é possível identificar algumas características visuais, tais como indícios de percolação de água ou contaminante no poço, cor da rocha, mineralogia, intemperismo e oxidação nas paredes.

#### 2.3.2.3. *Perfilagem de Fluxo (Flowmeter)*

As sondas de caracterização de fluxo (*flowmeter*) possuem três diferentes mecanismos de funcionamento disponíveis comercialmente, sendo o de pulso de calor (*Heat Pulse Flowmeter – HPF*), o eletromagnético (*Electromagnetic Flowmeter – EMF*) e o de hélice (*Spin Flowmeter – SF*). Todas possuem uma aplicação rápida e barata, possibilitando a obtenção dos parâmetros hidráulicos do poço em campo (Hess, 1986; Molz et al., 1994). Através delas identifica-se zonas mais transmissíveis e a direção vertical de fluxo em furos abertos e por modelagem matemática estima-se a transmissividade e a distribuição das cargas hidráulicas entre as principais zonas produtoras de água dos poços.

Neste trabalho, foi utilizado o *flowmeter* de pulso de calor (HPF) pela sua disponibilidade no mercado e por sua faixa de operação estar dentro dos limites de quantificação de fluxo adequados para o estudo. Este mecanismo funciona emitindo um pulso de calor, gerado por uma resistência, utilizado como traçador para determinar o fluxo em um intervalo (Hess, 1986; Paillet, 1993). Como mostra a Figura 2.6, a sonda é composta pela resistência e um par de termistores equidistantes, acima e abaixo da resistência. Durante seu funcionamento, caso o pulso de calor seja detectado no termistor superior, o fluxo é ascendente, caso seja detectado no inferior, o fluxo é descendente.

Pode ser utilizado em condições de fluxo natural e induzido, com faixa de operação entre as vazões de 0,1 e 8 L/min (Hess & Paillet, 1990; Barbosa, 2020). A resposta obtida em velocidade, através do tempo de detecção do pulso de calor, é convertida em vazão. Para essa conversão utiliza-se a seção interna da sonda por onde o fluxo se desloca e a velocidade de deslocamento do pulso (Barbosa, 2020).

Os dados obtidos são apresentados graficamente como a variação do fluxo ao longo das medições pontuais. As inflexões positivas indicam fluxo ascendente e inflexões negativas fluxos descendentes, possibilitando a interpretação da variação do fluxo entre os intervalos analisados.



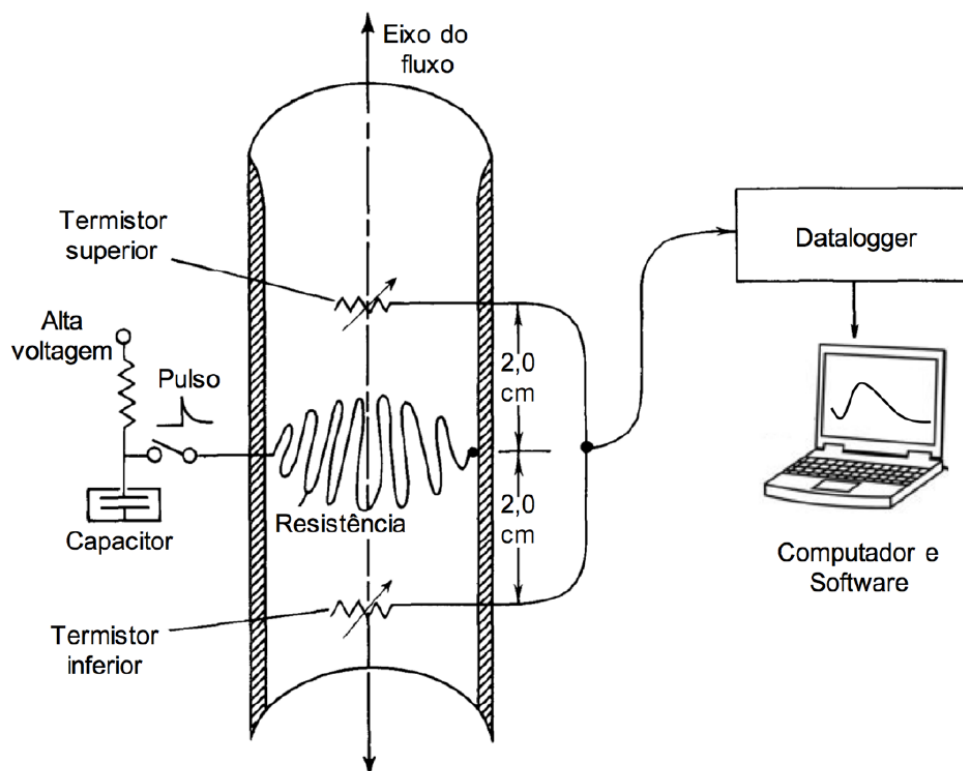


Figura 2.6: Esquema de funcionamento da sonda HPF, com a indicação do posicionamento da resistência e dos termistores em relação ao fluxo (Keys, 1990).

### 2.3.3. Ensaios com obturadores

Obturadores são equipamentos utilizados para isolar intervalos de interesse em perfurações e poços tubulares para a coleta de dados hidráulicos (carga hidráulica, transmissividade e armazenamento), físicos e químicos em intervalos discretos. Amplamente difundidos no mercado, os obturadores pneumáticos ou *packers*, são constituídos basicamente de dois cilindros de borracha infláveis e uma haste que os sustentam, além dos tubos de passagem de ar, transdutores de pressão, e bomba, equipamentos necessários para a realização de ensaios e amostragem dentro do intervalo.

A construção dos obturadores é modular, permitindo a utilização de um ou dois obturadores e a variação do espaçamento entre eles. Durante a utilização, os obturadores são inflados com injeção de gás ou ar comprimido, formando um selo contra parede do poço, isolando hidráulicamente o poço em diferentes níveis (Barbosa, 2020). Esse sistema de injeção é fechado e estanque, para que se impeça a perda de gás dentro do poço e possível interferência nas amostras. Além disso, a vedação do poço pelos obturadores é garantida através do monitoramento das cargas hidráulicas nos diferentes níveis.

### 2.3.3.1. Ensaios Hidráulicos

Existem diversos métodos de ensaios hidráulicos com obturadores, que variam de acordo com os parâmetros hidráulicos e escala necessária no estudo. Segundo Quinn et al. (2012) os quatro principais ensaios realizados são descritos Figura 2.7.

Ensaio	Resultado típico do ensaio	Método de interpretação	Análise dos resultados	Carga e fluxo	Vantagem
Carga constante		Thiem $T = \frac{Q}{2\pi\Delta H} \ln\left(\frac{r_o}{r_w}\right)$		Carga e fluxo constante para cada estágio	Valida a lei de Darcy
Slug/bail instantâneo		Hvorslev fluxo radial $T = \frac{m(A_{xs})}{2\pi} \ln\left(\frac{r_o}{r_w}\right)$		Carga e fluxo variam	Ensaio rápido
Bombeamento com vazão constante		Cooper-Jacob $T = \frac{2.3Q}{4\pi\Delta s}$		Carga variada e fluxo constante	Investiga grandes volumes
Recuperação após bombeamento		Recuperação de Theis $T = \frac{2.3Q}{4\pi\Delta s'}$		Carga e fluxo variam	Investiga grandes volumes

T – transmissividade  
Q – vazão  
 $r_w$  – raio do poço  
 $r_o$  – raio de influência

S – rebaixamento  
 $S'$  – rebaixamento residual  
 $A_{xs}$  – área da seção do poço temporário

dH – carga aplicada  
 $\Delta H_0$  – carga inicial aplicada  
 $\Delta H$  – carga no tempo t  
m – inclinação da reta

Figura 2.7: Quatro tipos principais de ensaios hidráulicos realizados com obturadores, seus resultados típicos, interpretações, aplicação em relação a carga e fluxo e vantagem (Quinn *et al.*, 2012).

Neste trabalho foi utilizado o método de carga constante, o qual consiste na injeção de água em diferentes vazões, mantidas constantes até a estabilização da carga hidráulica. Este método, através da solução analítica de Thiem (Thiem, 1906), permite quantificar a transmissividade do intervalo analisado em um raio de influência local, assim é possível distinguir a transição entre os fluxos lineares e não lineares (Holloway & Waddell, 2008; Quinn et al., 2012; Van der Kamp, 2001).

### 2.3.3.2. Amostragem Discreta

Para a coleta de amostras discretas, os obturadores devem ser inflados de acordo com o intervalo a ser amostrado. Após a estabilização da carga hidráulica

dentro do intervalo, a bomba instalada entre os obturadores é ligada. A bomba utilizada varia em função do objetivo da amostragem, usualmente, são utilizadas bombas centrífugas de baixa vazão, proporcionando menor distúrbio no meio e maior preservação das amostras (Barbosa, 2020).

## **2.4. Testes Hidráulicos**

### **2.4.1. Teste *cross-borehole* com *flowmeter***

O teste hidráulico do tipo *cross-borehole* possibilita medir o fluxo entre o poço de bombeamento e o de observação em uma condição de estresse do aquífero (Paillet, 1993), permitindo definir e caracterizar o fluxo da água subterrânea entre os poços tubulares, e entender como cada fratura se conecta no aquífero (Paillet, 1993; Williams & Paillet, 2002; Le Borgne et al., 2004; Le Borgne et al., 2006).

Ele se diferencia, pois, nele, ao contrário dos demais testes hidráulicos, são avaliados dois poços simultaneamente, o que permite entender como cada fraturada ou zona fraturada, identificada nos poços, se inserem no fluxo do aquífero avaliado (Paillet, 1993).

O teste geralmente é realizado após toda a caracterização do furo pelas perfilagens geofísicas (OTV, ATV e *flowmeter*), uma vez que é necessário o conhecimento geral das zonas de entrada e saída de água em cada poço, para definição dos intervalos de ensaio (Paillet, 1993). O ensaio é constituído de seis etapas executadas em sequência: i) o posicionamento do *flowmeter* na profundidade definida do poço de observação; ii) o início das medições de fluxo, com as medidas do fluxo ambiente até sua estabilização; iii) o acionamento do poço de bombeamento; iv) o acompanhamento das medições do fluxo induzido, gerado pelo bombeamento, até sua estabilização; v) o desligamento do poço de bombeamento; vi) a medição do fluxo até o retorno ao estado de fluxo ambiente inicial (Paillet, 1993; Williams & Paillet, 2002; Le Borgne et al., 2004, Le Borgne et al., 2006).

Em cada profundidade ensaiada é obtido um gráfico (fluxo x tempo) da variação de fluxo observada no poço de observação em função do bombeamento do poço de bombeamento (fluxo transiente) (Paillet, 1993). Este gráfico permite identificar as alterações de fluxo no poço de observação que comparadas aos dados obtidos pelos ensaios geofísicos, permitem definir fraturas ou zonas de fraturadas que estão conectadas dentro do aquífero estudado.

#### **2.4.2. Teste de Bombeamento em Aquífero Fraturado**

Um teste de bombeamento consiste no bombeamento ininterrupto de um poço e a medição do rebaixamento do seu nível de água durante um certo intervalo de tempo. Geralmente, são utilizados para determinar as condições hidráulicas e as vazões de exploração de poços de produção de água subterrânea.

Os testes podem ser realizados com diversos arranjos e algumas soluções matemáticas para sua interpretação, contudo, a solução de Theis (1935) é a mais utilizada (Domenico & Schwartz, 1990). Para tanto, o arranjo necessita de um poço de bombeamento e um ou mais poços de observação e/ou piezômetros em que se possa medir o rebaixamento do nível d'água em resposta ao bombeamento (Domenico & Schwartz, 1990).

Em alguns casos, tendo em vista as dificuldades técnicas e econômicas de se possuir mais de um poço, utiliza-se apenas o poço de bombeamento durante o teste (Domenico & Schwartz, 1990). Também se utiliza a solução de Theis (1935) neste caso.

A partir da interpretação da curva de rebaixamento pelo tempo segundo a solução de Theis (1935) os aquíferos podem ser classificados como confinados, semiconfinados, livres ou limitados devido a presença de barreiras hidráulicas (Freeze & Cherry, 1979). Sua classificação indica o seu comportamento hidráulico e interação com os demais aquíferos.

Habitualmente, em aquíferos fraturados utiliza-se apenas um poço durante o teste de bombeamento, em razão das profundidades e complexidades de perfuração em rocha (Domenico & Schwartz, 1990). Contudo, podem ser monitorados poços instalados em profundidades mais rasas do aquífero e/ou poços tubulares mais distantes, auxiliando na interpretação do teste e no entendimento da interação entre os aquíferos da área.

#### **2.5. Modelos Conceituais**

Modelos conceituais podem ser definidos como a síntese e a representação escrita ou gráfica de um sistema e os seus processos, sejam eles biológicos, físicos e/ou químicos (USEPA, 2011; ABNT, 2022). No ramo das geociências, principalmente se tratando de aquíferos fraturados, os modelos conceituais são a base para o desenvolvimento dos demais estudos, sendo aplicados no gerenciamento de áreas contaminadas (Fanti, 2017; Lojkasek-Lima, 2018; Hart et al., 2022) e na hidrogeologia (Fiume, 2020; Pino, 2021; Sartorio, 2019; Menezes, 2022).

No gerenciamento de áreas contaminadas, estes modelos são construídos com base na aquisição de dados históricos (uso da terra, ocupação e processos antrópicos desenvolvidos), do meio físico (geomorfologia, hidrografia, geologia e hidrogeologia), além da identificação e investigação das fontes de contaminação, contaminantes, caminhos de migração, riscos e receptores em cada meio (Burger et al., 2008; CETESB, 2017).

Os modelos conceituais podem ser representados de diversas formas, mas usualmente contém uma descrição escrita complementando uma representação gráfica (Burger et al., 2008; CETESB, 2017), e podem evoluir para outras representações de acordo com a maturidade e complexidade da área investigada (USEPA, 2011). Suas representações são a síntese de todo o conhecimento obtido para o sítio de estudo, aglutinando os dados obtidos de forma independente (histórico de uso da área, fontes de contaminação, vias de exposição e incertezas associadas, por exemplo), para que possibilite uma melhor interpretação da área e comunicação simples do problema. Contudo, também podem representar apenas um conjunto dos dados levantados, como a geologia ou a hidrogeologia, possibilitando que com o avanço do conhecimento os modelos se integrem e possibilitem a construção de um modelo mais representativo.

A cada evolução do conhecimento e aquisição de novos dados, o modelo conceitual deve ser atualizado, uma vez que representa uma fotografia estática do momento em que foi elaborado, ou seja, representa um tempo específico.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1. Caracterização do Aquífero do Manto de Intemperismo**

A caracterização do aquífero do manto de intemperismo foi realizada pela descrição geológica do material proveniente das 97 sondagens executadas na área de estudo durante todo o seu processo de gerenciamento ambiental. Dentre estas 97 sondagens (Figura 3.1), 21 foram realizadas mecanicamente pelo método de *direct push* com *piston sampler* e as 76 restantes por meio de trado manual.

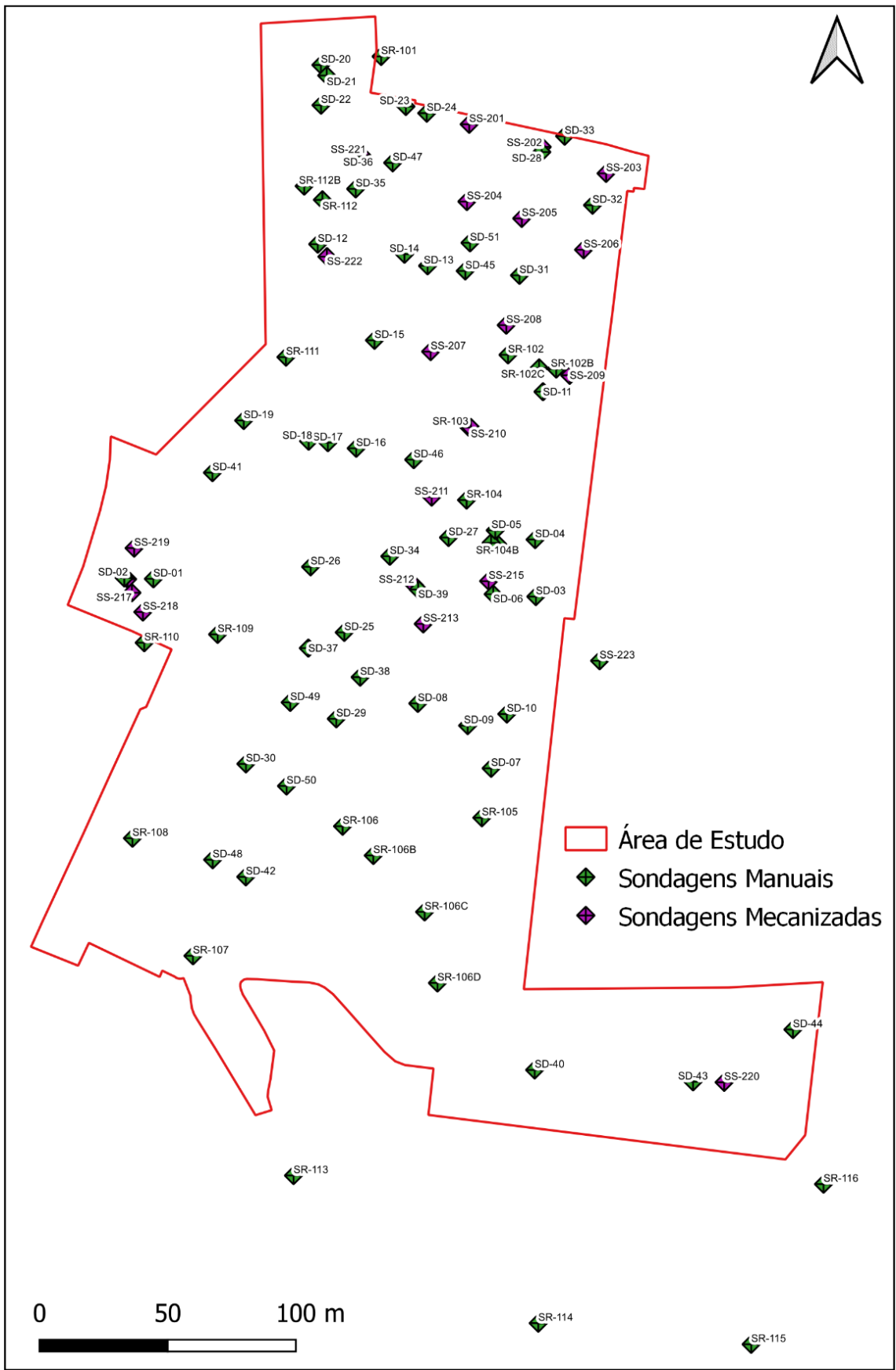


Figura 3.1: Localização das sondagens realizadas na área de estudo ao longo de todo o seu gerenciamento ambiental, com a indicação das sondagens realizadas por meio de trado manual e as realizadas mecanicamente pelo método de *direct push* com *piston sampler*.

A sondagem manual foi executada por meio de um trado manual de 4" montado em um tripé onde se acopla um sistema de polias (Figura 3.2), que auxilia o processo de sondagem. Ao longo da sondagem o trado foi inserido na perfuração e rotacionado manualmente, coletando uma porção de solo deformado que foi retirado do equipamento e descrito em superfície.

Nas sondagens realizadas mecanicamente, foi utilizado o método de cravação contínua (*direct-push*), que consistiu na cravação de um amostrador descartável (*liner*) no solo com auxílio de força mecânica (Figura 3.2). Para a proteção do amostrador descartável, foi utilizado um sistema de *piston sampler*, tubo metálico com ponteira que pode ser acionada em superfície, permitindo a abertura do amostrador na profundidade de coleta desejada. Após a cravação do *liner*, as amostras indeformadas foram trazidas para superfície e descritas. Em todas as sondagens, o procedimento foi realizado continuamente até a profundidade desejada e/ou a impenetrabilidade do método, fornecendo a maior quantidade possível de material do perfil sondado. Na descrição do material, foram consideradas suas características organolépticas e físicas, gerando uma descrição baseada na granulometria do material, coloração, estruturação, presença de minerais e grau de intemperismo.

Para a interpretação geológica do material descrito, pôr a área estar inserida no contexto do embasamento do Complexo Embu e seu manto de intemperismo, foi adotada a metodologia de Vaz (1996) para solos de alteração de rocha. Assim, o material geológico foi interpretado com base na presença de estruturas e na resistência ao método de sondagem empregado, sendo dividido, do maior grau de intemperismo para o menor em: solo eluvial (SE), solo de alteração de rocha (SA), rocha alterada mole (RAM), rocha alterada dura (RAD) e rocha sã (Vaz, 1996; Vaz e Gurgueira, 2017).



Figura 3.2: Métodos de sondagem empregados na área de estudo. (a) Sondagem por trado manual: (a.1) arranjo do equipamento para sondagem manual; (a.2) amostra deformada do solo de alteração de rocha coletada por trado manual; (a.3) amostra deformada do solo da rocha alterada mole coletada por trado manual. (b) Sondagem mecanizada: (b.1) arranjo do equipamento para sondagem por *direct push* e momento em que o bico do amostrador é acionado; (b.2) bico do amostrador *piston sampler*, o qual é acionado em superfície para dar início a coleta; (b.3) amostras indeformadas de um perfil de sondagem coletadas em *liner* por *direct push*.

A espessura do aquífero do manto de intemperismo foi definida com base nos modelos geológicos da superfície do terreno e do topo da RAD. Ambos os modelos foram gerados por interpolação pelo método de krigagem no *software* Surfer utilizando: os dados topográficos da área junto ao modelo digital de elevação (MDE), disponível no banco de dados do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2022) para o modelo superficial; e os dados de profundidade da RAD obtidos pela interpretação das sondagens para o modelo do topo da rocha alterada dura.

A subtração destes dois modelos possibilitou determinar a espessura do aquífero do manto de intemperismo (SE, SA e RAM) e o topo do aquífero fraturado, delimitado pelo topo da RAD e conseqüentemente da mudança de permeabilidade no meio.



Demais dados utilizados para a caracterização do aquífero do manto de intemperismo, como a condutividade hidráulica, foram obtidos de ensaios realizados previamente na área, no contexto do seu gerenciamento ambiental.

### **3.2. Análise de Lineamentos**

O estudo regional de lineamentos foi realizado com base em um modelo digital de elevação (MDE). O MDE foi obtido no banco de dados do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2022) e pertence ao levantamento dos satélites da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM).

Após a seleção da quadrícula do MDE que compreende a região da área de estudo, o arquivo georreferenciado foi exportado do banco de dados do USGS e adicionado no *software* de geoprocessamento QGis v.3.18.3. Dentro do *software*, o MDE (arquivo do tipo *raster*) foi renderizado atribuindo os valores de elevação a representação gráfica do MDE em escala de cinza.

Em seguida, utilizando a ferramenta de sombreamento nativa do *software* QGis, foram gerados dois mapas: o primeiro com incidência de luz a 45° (nordeste); e o segundo com incidência de luz a 315°. Em ambos os produtos foi utilizado o ângulo vertical de 45° em relação ao solo para a incidência de luz.

Com estes mapas, foi possível a vetorização manual em formato de *shapefile* (shp) dos lineamentos morfoestruturais presentes na região. Para tanto, foram adotados os seguintes critérios:

- Escala de visualização de 1:30.000;
- Consideradas feições visíveis, evitando interpolação;
- Mapa de sombreamento com incidência de luz a 45° (nordeste), ressaltando estruturas com direção NW-SE
- Mapa de sombreamento com incidência de luz a 315° (noroeste), ressaltando estruturas com direção NE-SW; e
- Considera apenas uma vez feições identificadas nos dois mapas, para evitar falseamento estatístico.

Após a vetorização dos lineamentos, a tabela de atributos ligada ao arquivo shp foi classificado de acordo com a orientação obtida para cada lineamento traçado. Desta forma, os lineamentos foram classificados em seis intervalos:

NNE (N01E – N20E); NE (N21E – N70E); ENE (N71E – N89E); NNW (N01W – N20W); NW (N21W – N70W); WNW (N70W – N89W).

Os intervalos e as frequências obtidas foram plotadas e analisadas em diagrama de roseta com a representação dos azimutes dos lineamentos observados por meio do *software GeoRose*.

### **3.3. Perfilagens Geofísicas**

Para a obtenção de informações mais detalhadas do perfil litológico e estrutural do maciço rochoso, foram executadas diferentes técnicas de perfilagem geofísica em dois poços tubulares da área, denominados PT-A e PT-B.

Durante o estudo foi realizada a filmagem e as perfilagens acústica (*Acoustic Televiewer - ATV*), ótica (*Optical Televiewer - OTV*) e de fluxo (*Heat Pulse Flowmeter - HPF*) dos poços tubulares. Antes das perfilagens, todos os equipamentos de bombeamento foram removidos e as paredes dos poços tubulares limpas, possibilitando a execução das atividades.

#### **3.3.1. Filmagem**

A filmagem foi a primeira técnica empregada, pois a qualidade da imagem depende da transparência da água e qualquer intervenção anterior causaria o aumento de turbidez e conseqüente perda de qualidade das imagens. Além disso, a câmara funciona como uma ferramenta de inspeção, ou seja, uma técnica mais barata, quando comparada às demais, e mais adequada para a avaliar as condições construtivas e de integridade do poço. O equipamento utilizado na filmagem foi uma sonda portátil modelo R-Cam 1300XS da Laval Underground Surveys (LUS) composta pela câmara com visada frontal e lateral com iluminação em LED, centralizador, guincho, controladora e bateria (Figura 3.3).

A câmara não permite a filmagem frontal e lateral simultaneamente, assim as trocas são controladas em superfície junto ao monitor da câmara, que também possibilita as visadas em 360° da câmara lateral. Portanto, todo o procedimento e velocidade de descida e subida da câmara foi controlado por um operador junto a controladora, observando as feições (Figura 3.4) e alternando as câmeras conforme a necessidade de detalhamento das observações. As imagens foram gravadas possibilitando a reanálise das feições e estruturas observadas, se necessário.

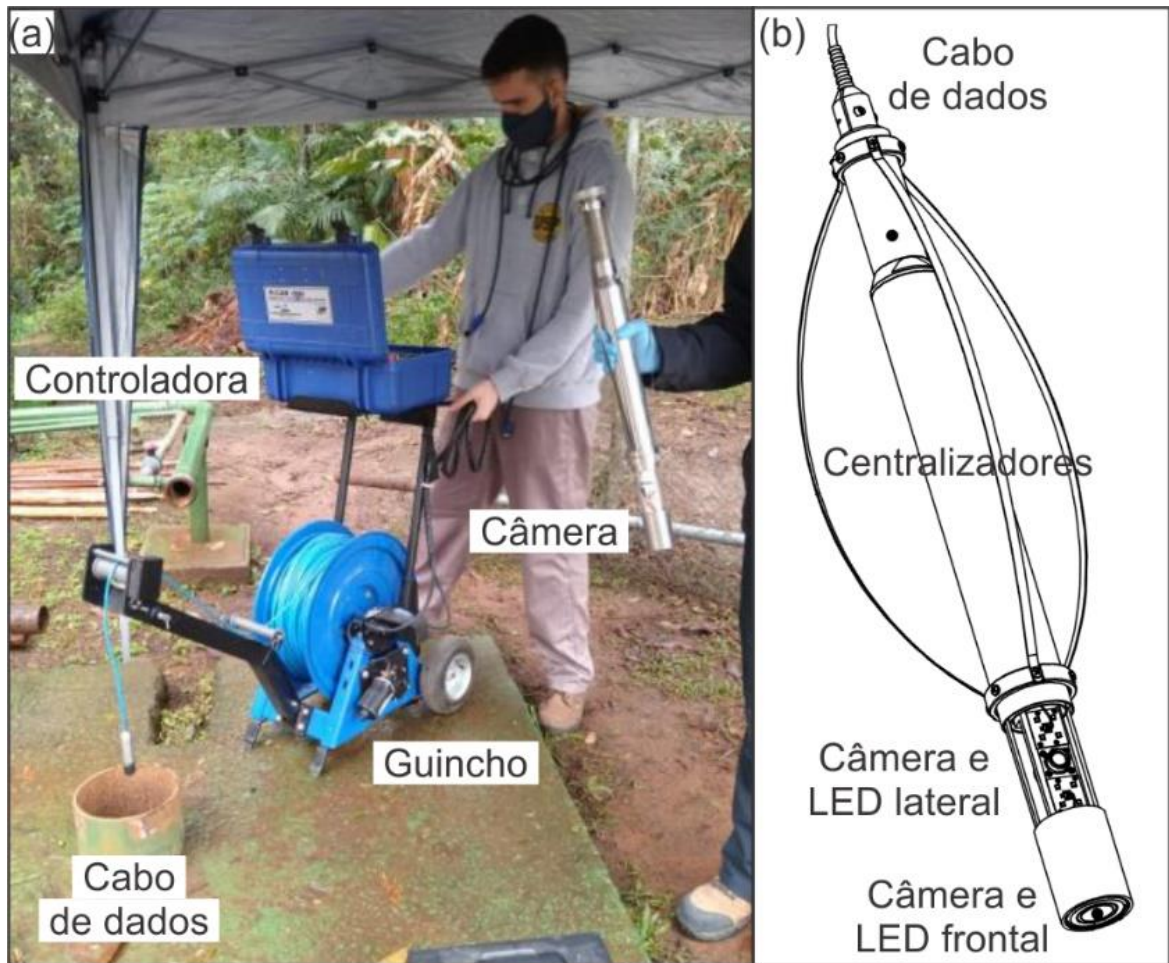


Figura 3.3: Arranjo do equipamento utilizado para a filmagem dos poços tubulares investigados. (a) montagem realizada no poço tubular PT-B; (b) sonda portátil modelo R-Cam 1300XS da Laval Underground Surveys (LUS) (adaptado de LUS, 2022).

Com este equipamento foi possível caracterizar a rocha que compõe o aquífero fraturado, através das feições litológicas observadas nas imagens, e identificar as possíveis interferências e zonas de maior adensamento de fraturas (Figura 3.4). Contudo, o equipamento não possui sensores de orientação, ou seja, não permite interpretações estruturais das feições observadas.



Figura 3.4: Exemplos das observações feitas ao longo das filmagens dos poços tubulares PT-A e PT-B. (a) feições litológicas, rocha do poço tubular PT-A; (b) feições construtivas, fundo do poço tubular PT-A; (c) feições estruturais, zona de quebra do poço tubular PT-B.

### **3.3.2. Perfilagem ótica**

Na perfilagem ótica (*Optical Televiwer* - OTV) foi utilizada uma sonda modelo QL40-OBI-2G da Advanced Logic Technology (ALT) com 40 mm de diâmetro e comprimento de 1,47 metros. A sonda é composta pelo sensor de orientação APS 544 com três acelerômetros e um magnetômetro triaxial, e por um anel de lâmpadas de LED, uma câmera de alta resolução e um refletor hiperbólico (Figura 3.5). Suas características construtivas permitem a operação com temperaturas de até 70° e pressão de 200 bar, sendo ideal para perfilagem de poços tubulares acima e abaixo do nível d'água.

Por ser um sonda ótica, a qualidade da imagem depende da centralização da ferramenta no furo e da visibilidade das paredes. Por conta disso a perfilagem foi realizada após a limpeza das paredes do poço, e o primeiro passo foi a instalação dos centralizadores na sonda que em seguida foi acoplada ao guincho e posicionada na boca do furo. Com a sonda posicionada, se iniciou sua comunicação com o computador e o seu referencial de profundidade foi zerado com a boca do poço.

Após estes procedimentos iniciais, a sonda foi posicionada nas profundidades máximas definidas pelas condições de segurança observadas na filmagem dos poços e a perfilagem foi realizada no sentido ascendente. Foi adotada a configuração de 0,4 mm como intervalo de registro e 2,0 m/min como velocidade de subida da sonda, possibilitando a aquisição de dados em alta resolução e em tempo real. Por fim, após a subida da sonda, o referencial zero adotado foi comparado e a sonda foi removida do furo e limpa.

A utilização desta sonda teve como objetivo a identificação de fraturas e seus aspectos estruturais (atitudes e abertura aparente) nos poços, inclusive com a identificação visual de feições, já que o produto obtido é uma imagem colorida e orientada de 360° em alta resolução da parede do poço/furo.

### **3.3.3. Perfilagem acústica**

Durante a perfilagem acústica (*Acoustic Televiwer* - ATV) foi utilizada uma sonda modelo QL40-ABI-2G da fabricante ALT (Figura 3.5) com 40 mm de diâmetro e 1,61 metros de comprimento. A sonda é composta pelo sensor de orientação APS 544 com três acelerômetros e um magnetômetro triaxial, permitindo a medição da direção e do mergulho verdadeiros das estruturadas perfiladas. O sensor acústico é

composto por um transdutor que emite uma onda ultrassônica de frequência de 1,2 MHz e um espelho de foco giratório, que reflete a onda em 90° com velocidade de rotação de até 35 rotações/s. O conjunto também é capaz de realizar as medidas de calibre do poço, com uma resolução de 0,08 mm.

Suas características construtivas permitem a operação com temperaturas de até 70° e pressão de 200 bar, sendo ideal para perfilagem de poços tubulares com ou sem revestimento abaixo do nível d'água ou com algum tipo de fluido, uma vez que para a propagação da onda é necessário um meio fluído.

O mesmo procedimento inicial realizado com a sonda OTV foi aplicado na ATV em ambos os poços tubulares (PT-A e PT-B), com a instalação dos centralizadores na sonda, seu posicionamento na boca do furo, conexão com o computador e o procedimento de zeragem com o referencial da boca do poço.

Com o equipamento pronto para operação, a sonda foi descida até as profundidades máximas definidas pelas condições de segurança observadas na filmagem dos poços e a perfilagem foi realizada no sentido ascendente em toda seção abaixo do nível da água. As perfilagens foram realizadas com resolução de 144 pontos por volta e 4,0 mm de espaçamento entre os intervalos de registro, a sonda foi operada com velocidade de deslocamento de 4,0 m/min.

Desta forma, a sonda é capaz de gerar uma imagem contínua em alta resolução da parede do poço, que foi utilizada para identificar as fraturas presentes nos poços e seus aspectos estruturais (atitudes e abertura aparente), assim como a variação no calibre dos poços tubulares.

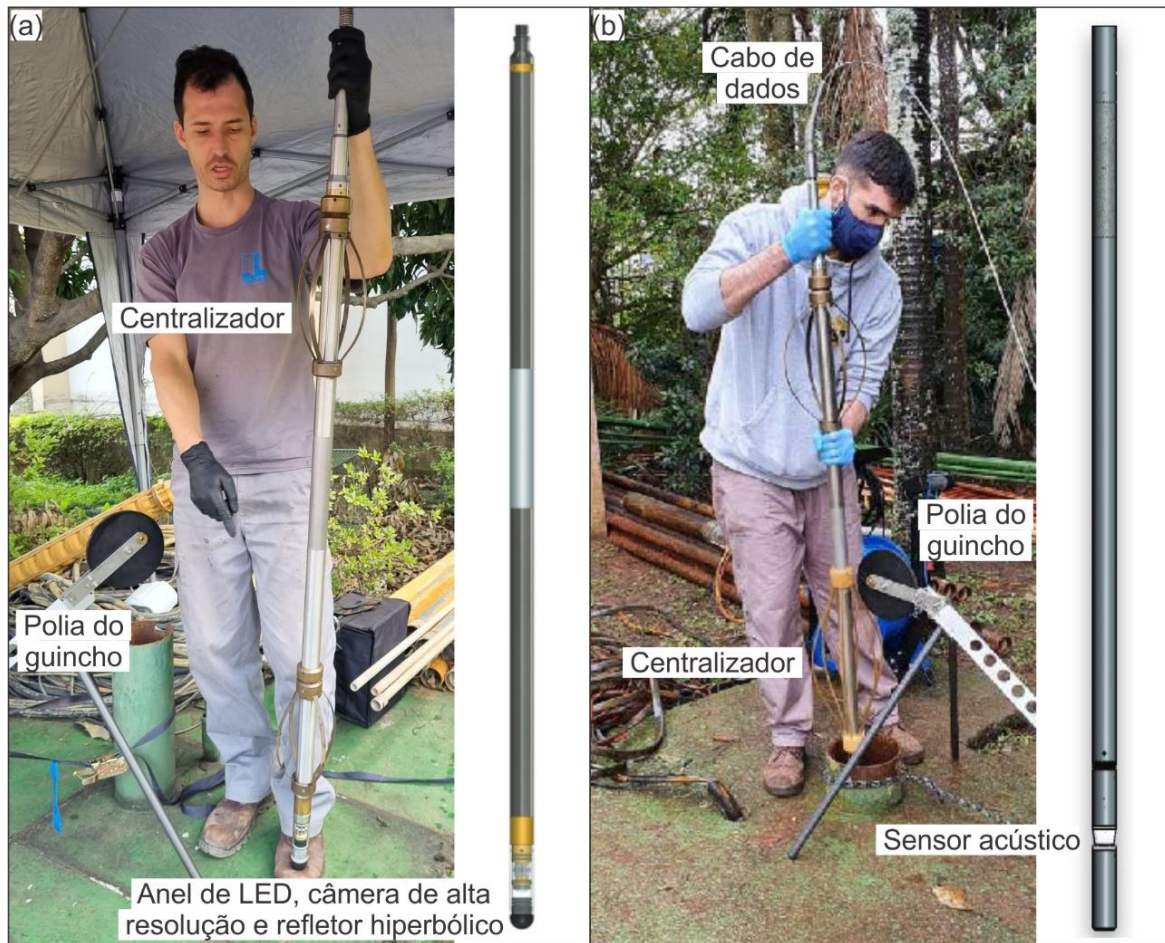


Figura 3.5: Arranjo utilizado em campo e detalhes das: (a) sonda ótica QL40-OBI-2G da Advanced Logic Technology (ALT), com os acelerômetros e o magnetômetro no corpo da sonda e anel de lâmpadas de LED, a câmera de alta resolução e o refletor hiperbólico em sua ponta (Adaptado de MSI, 2022); (b) sonda acústica QL-40-ABI-2G da ALT com a indicação da localização do sensor acústico (Adaptado de MSI, 2022).

### 3.3.4. Perfilagem de fluxo

A perfilagem de fluxo foi realizada com um *flowmeter* de pulso de calor (*Heat Pulse Flowmeter* - HPF) modelo HPF-2293 da Mount Sopris Instruments (MSI), capaz de quantificar vazões entre 0,1 e 4,0 L/min. A sonda possui 41 mm de diâmetro e 1,22 metros de comprimento e é composta por dois termistores, localizados acima e abaixo da resistência responsável pela emissão do pulso de calor (Figura 3.6). Os termistores captam as variações de temperatura na água que flui pela ferramenta em função do tempo, determinando os fluxos medidos.

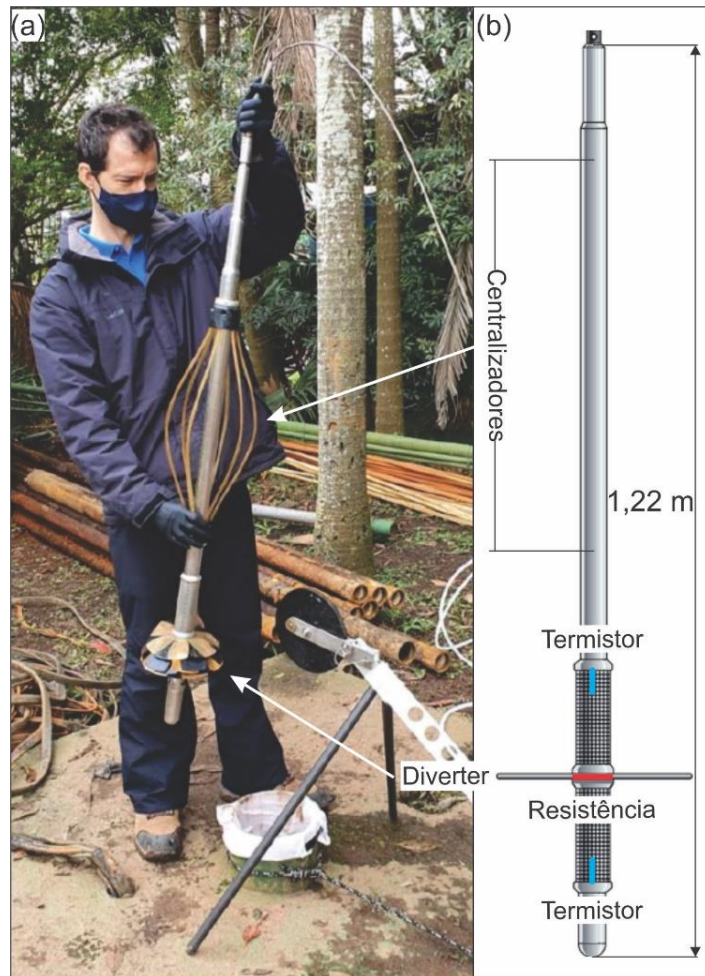


Figura 3.6: Arranjo utilizado para a perfilagem de fluxo. (a) montagem do equipamento no poço tubular PT-B; (b) sonda HPF-2293 da MSI com as dimensões e a indicação das principais peças (Adaptado de MSI, 2022).

Para a sua utilização, procedimentos prévios similares aos adotados nas outras sondas foram executados. Além da instalação dos centralizadores, foram instalados *diverters* condizentes com o diâmetro do poço tubular ensaiado (6" no poço tubular PT-A e 8" no PT-B). Os *diverters* são discos acoplados a sonda HPF para que o fluxo convirja para dentro da sonda, evitando perda do fluxo entre a sonda e a parede do poço (Figura 3.7) e conseqüentemente a subamostragem.

Após a instalação dos dispositivos, a sonda foi conectada ao guincho, posicionada na boca do poço e seu procedimento de zeragem da profundidade com a boca do poço foi realizado.

Durante o processo de coleta de dados, a sonda HPF foi posicionada em trechos acima e abaixo de fraturas identificadas durante as etapas anteriores como aparentemente abertas ou com indício de fluxo. Em cada profundidade a sonda foi posicionada e se aguardou a estabilização do fluxo induzido por seu movimento, e em seguida foram realizadas as medições.

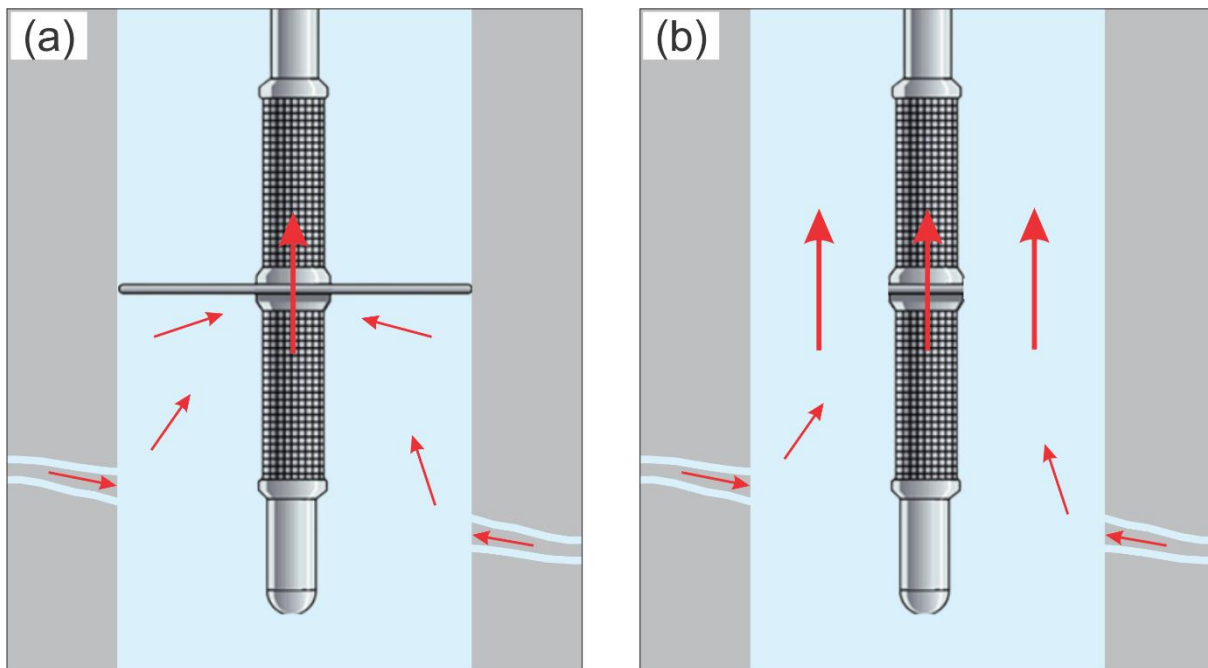


Figura 3.7: Exemplo da funcionalidade do *diverter* em relação ao fluxo (setas vermelhas) no poço tubular. (a) sonda HPF posicionada para o teste com *diverter* instalado, o fluxo converge para o interior da sonda tornando o ensaio efetivo; (b) sonda HPF posicionada para o teste sem o *diverter* instalado, parte do fluxo é perdido pelas laterais da sonda, gerando subamostragem do fluxo.

Nos dois poços tubulares, os ensaios foram realizados em condição de fluxo ambiente e induzido. O fluxo ambiente foi medido sem perturbação das condições de fluxo e cargas hidráulicas do poços, a sonda apenas foi posicionada no intervalo de teste e as medições foram realizadas. Nas medições de fluxo induzido, o mesmo procedimento com a sonda foi adotado, porém os poços tubulares foram perturbados pela injeção e/ou bombeamento de água, estimulando o fluxo nas fraturas que apresentaram fluxos pequenos ou nulos em condição ambiente. Para o teste no poço tubular PT-A, houve o seu bombeamento com uma bomba centrífuga (Grundfos MP1) a uma vazão constante de 3,7 L/min. Já no poço tubular PT-B, dois cenários foram testados: o primeiro consistiu na injeção de água no poço a uma vazão constante de 3,7 L/min; e o segundo no bombeamento do poço tubular PT-A com sua bomba de captação a uma vazão constante de 500 L/min.

Ao fim dos ensaios foram realizadas as medidas de fluxo zero no topo do poço nas condições de fluxo ambiente e induzido, que são utilizadas para a aferição e correção dos dados na etapa de processamento. No poço tubular PT-B as aferições de fluxo zero não puderam ser realizadas devido à existência de fluxo induzido pela fratura que verte de água na zona não saturada. Desta forma, para a aferição do ensaio, foi realizada a comparação entre a vazão próxima ao nível d'água em condição ambiente e induzida. A diferença de 1,1 L/min obtida foi utilizada para fazer a



compensação dos dados de vazão por meio de uma regularização linear, adequando os dados para a calibração de fluxo conhecido. No poço tubular PT-A a aferição pode ser feita normalmente de acordo com os procedimentos indicados por Barbosa (2020).

Com base nestes ensaios foi possível identificar as condições e velocidade de fluxo dentre as diversas fraturas dos poços estudados, determinando suas principais zonas de entrada e saída de água.

### **3.4. Interpretação dos Dados Estruturais e Hidráulicos Obtidos pelas Perfilagens Geofísicas**

Os dados obtidos durante as etapas de perfilagens dos poços tubulares foram inseridos no *software* WellCad v.5.5 para tratamento. O WellCad é um *software* de aquisição e processamento de dados de poços utilizado em diversas áreas das geociências, que através de seus diversos módulos, permite a edição, análise e apresentação de diversos tipos de dados.

Logo, os dados construtivos, litológicos, estruturais e hidráulicos obtidos durante as etapas de investigação dos poços tubulares foram inseridos no *software* para análise (Apêndice A). Os dados das fraturas obtidos nas perfilagens OTV e ATV foram inseridos no módulo específico de interpretação estrutural do WellCad para identificação e classificação automática com base em as suas características (abertura aparente, direção e mergulho). Em seguida, a identificação e classificação das fraturas dos perfis ótico e acústico foi conferida manualmente e as fraturas divididas em dois grupos de acordo com a abertura aparente: fraturas aparentemente fechadas, com abertura aparente menor que 10 mm (traçadas em azul); e fraturas aparentemente abertas, com abertura aparente maior que 10 mm (traçadas em vermelho).

Após isto, ainda no *software*, foi aplicada a correção do viés de orientação pelo método de Terzaghi (1965) para possibilitar a correta análise da densidade e espaçamento das fraturas. Assim, os dados obtidos em anotação do tipo Clar puderam ser plotados em estereogramas em projeção polar, em diagramas de roseta com as direções das fraturas e em histogramas com a densidade dos mergulhos observados. Estes produtos gráficos auxiliaram na classificação, por similaridade, dos principais grupos de fraturas observadas em cada poço tubular e conseqüentemente no aquífero fraturado sobre estudo.

Além dos dados estruturais, os dados hidráulicos adquiridos pela perfilagem de fluxo realizada pela sonda HPF também foram inseridos no *software* WellCad. Os

valores de fluxo obtidos em cada condição ensaiada foram plotados e interpolados com base nas ferramentas do software, possibilitando a interpretação da condição do fluxo dentro da coluna de água do poço (ascendente ou descendente) e indicando as zonas de entrada ou saída de águas pelas fraturas hidráulicamente ativas. Um exemplo de interpretação da curva gerada pela interpolação do software pode ser visto na Figura 3.8.

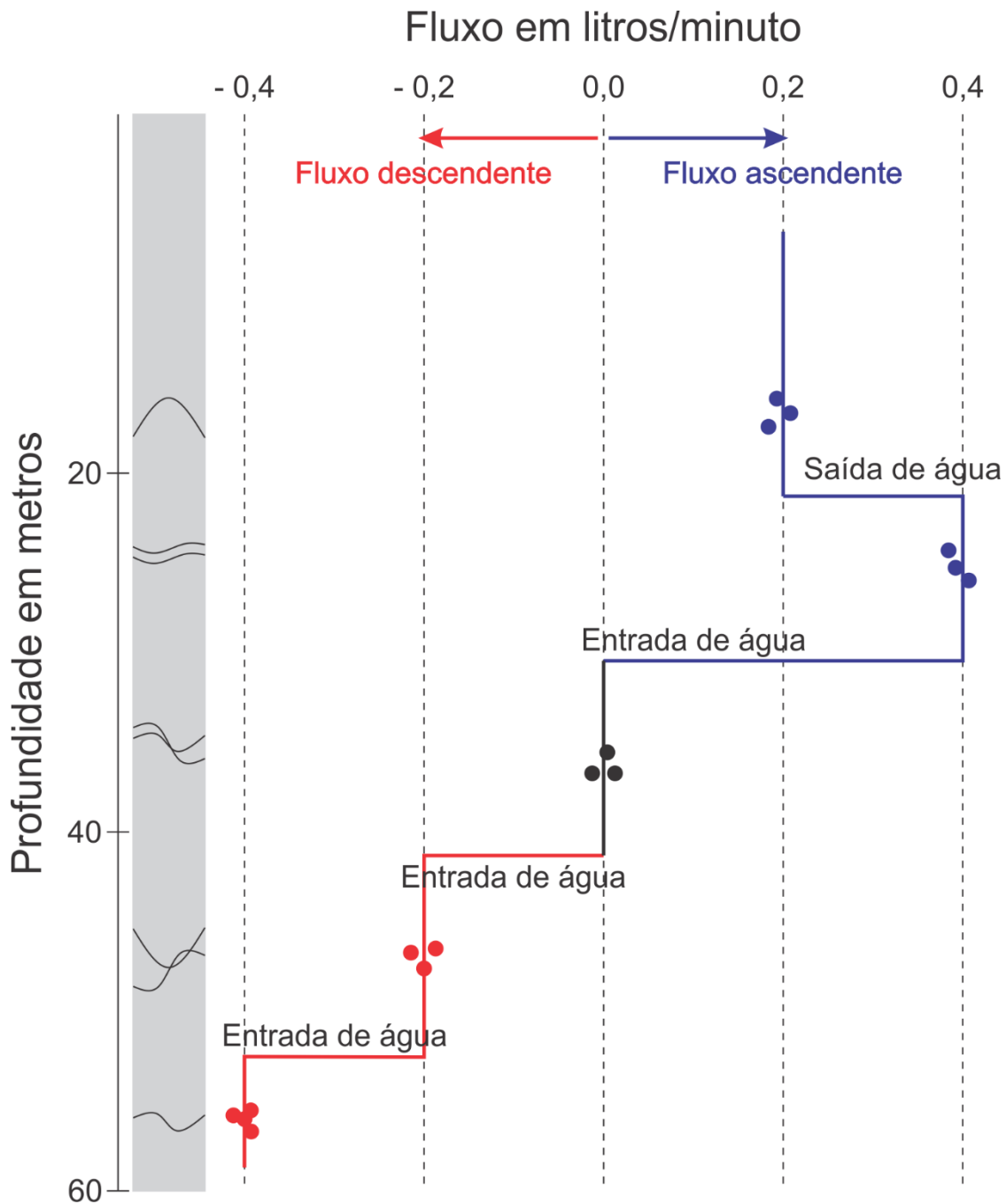


Figura 3.8: Exemplo da interpretação gráfica dos dados obtidos pela sonda HPF. Os pontos em vermelho e azul representam os pontos medidos logo acima ou abaixo das fraturas representativas para o fluxo e as linhas a interpretação de fluxo realizada, indicando os trechos com fluxo ascendente ou descendente na coluna de água do poço e os pontos de entrada ou saída de água no poço

### 3.5. Teste Hidráulico Cross-borehole com HPF

Após a identificação das principais zonas de fluxo nos poços tubulares com a interpretação dos dados obtidos pela da sonda HPF, o teste hidráulico do tipo *cross-borehole* foi realizado para caracterizar a conexão das fraturas entre os poços tubulares PT-A e PT-B.

O teste foi realizado por injeção e não bombeamento e consistiu na injeção constante de água a uma vazão de 50,0 L/min no poço tubular PT-B (poço de injeção) e o monitoramento da resposta a injeção no poço tubular PT-A (poço de monitoramento), por meio da sonda HPF. Foram utilizados intervalos pré-definidos com base nas interpretações de fluxo realizadas com a sonda HPF, sendo selecionados os intervalos com fraturas hidráulicamente ativas.

Em cada intervalo testado, o seguinte procedimento foi adotado:

- I. Posicionamento da sonda HPF no intervalo pré-definido;
- II. Medição inicial do fluxo ambiente até a estabilização do fluxo causado pelo deslocamento da sonda no poço, obtendo o fluxo ambiente do intervalo;
- III. Início da injeção de água a vazão de 50,0 L/min no poço tubular PT-B;
- IV. Medição da variação do fluxo causado pela perturbação no aquífero (injeção de água no poço tubular PT-B) até a estabilização do fluxo induzido;
- V. Fim da injeção de água no poço tubular PT-B; e
- VI. Medição da variação do fluxo em função do fim da injeção até a sua estabilização na condição de fluxo ambiente inicial.

Os dados gerados pelo teste foram inseridos no *software* WellCad, e tratados em planilhas, gerando gráficos de tempo por fluxo observado no HPF, permitindo identificar o tempo de resposta e a alteração do fluxo em relação à injeção de água para cada intervalo (Figura 3.9). Desta forma o teste hidráulico do tipo *cross-borehole* possibilitou medir o fluxo entre o poço de injeção e o de observação em uma condição de estresse do aquífero e definir e caracterizar o fluxo da água subterrânea entre os poços tubulares PT-A e PT-B.

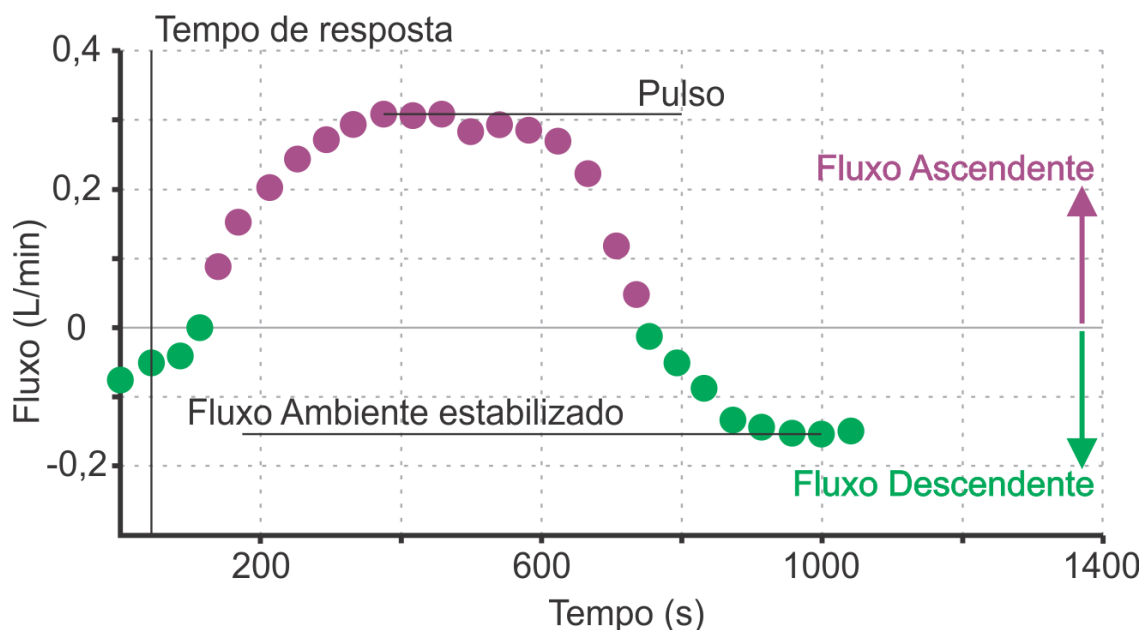


Figura 3.9: Exemplo da interpretação gráfica realizada em cada intervalo do ensaio de *cross-borehole*. Os pontos indicam as medições do fluxo realizadas em função do tempo, representando fluxos ascendentes quando positivas e descendentes quando negativas. A primeira modificação no fluxo ambiente inicial representa o tempo de resposta do ensaio, ou seja, o tempo até que a perturbação do poço de injeção gere efeito no poço monitorado. Os maiores valores de fluxo representam o pulso observado e o patamar inferior ao fim do teste a estabilização do fluxo ambiente.

### 3.6. Teste Hidráulico e Amostragem Discreta de Água Subterrânea com Obturadores

O ensaio de carga constante e a amostragem discreta de água subterrânea foram realizados no poço tubular PT-B com a utilização de um conjunto de obturadores pneumáticos (*packers*) modelo P5-9 Packer da RST que operam de acordo com o arranjo apresentado nas Figura 3.10 e Figura 3.11. Neste estudo, os obturadores foram utilizados com um espaçamento de 1,0 metro, ou seja, sendo capaz de isolar intervalos de um metro de espessura, e com pressão diferencial para isolamento das zonas selecionadas superior a 7 bar.

Com base nas perfilagens e interpretações realizadas, foram selecionados seis intervalos mais representativos para o fluxo, os quais foram ensaiados e amostrados. Desta forma, individualmente, os obturados foram inflados e observou-se as relações de carga entre os níveis isolados. Em cada intervalo, foi realizada a coleta das amostras de água subterrânea e posteriormente os ensaios hidráulicos, evitando qualquer tipo de contaminação.

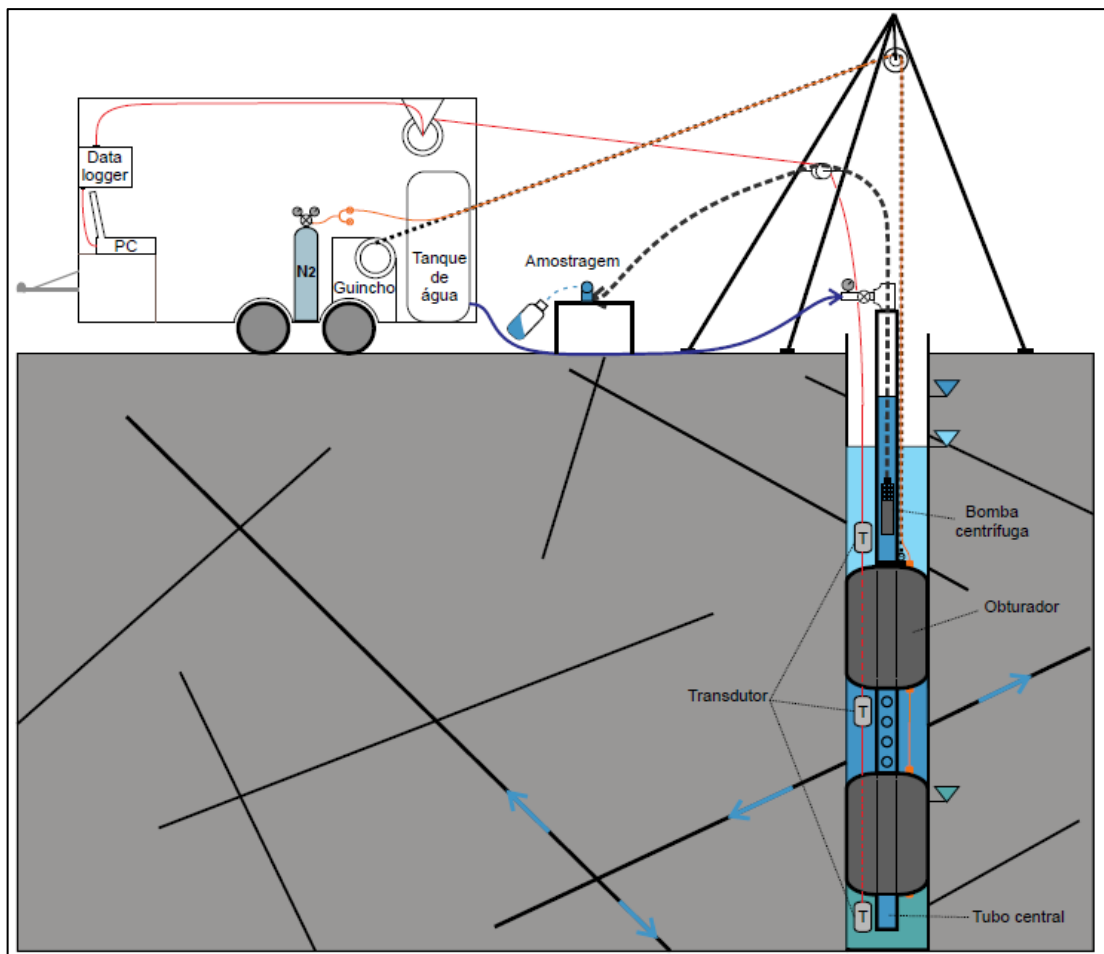


Figura 3.10: Arranjo esquemático do sistema utilizado para a realização da amostragem discreta e do ensaio hidráulico de perda d'água sob pressão, ambos com a utilização de obturadores (Barbosa, 2020).

Após a estabilização da carga hidráulica no intervalo selecionado, se deu início ao procedimento de amostragem discreta de água subterrânea. A amostra foi coletada pelo método de baixa vazão (*low flow*) através de uma bomba centrífuga modelo MP1 da Grundfos, capaz de operar em baixas vazões e altas profundidades, posicionada entre os obturados. Em superfície, as amostras foram armazenadas em frascos apropriados, condicionadas entre 0 e 4°C e enviadas ao laboratório em menos de 24 horas. Conforme as substâncias químicas de interesse na área, as amostras foram analisadas para os compostos orgânicos voláteis (VOC) e semivoláteis (SVOC) em laboratório devidamente certificado.

O teste hidráulico de carga constante realizado permite obter a transmissividade do intervalo ensaiado. Para o início do teste os procedimentos descritos acima foram realizados, posicionamento dos obturadores, estabilização da carga hidráulica no intervalo ensaiado e coleta de amostra discreta de água subterrânea. Com estes procedimentos realizados, foi possível iniciar o teste, para cada intervalo foi injetado

água em uma vazão constante até a estabilização da carga hidráulica, em seguida, a vazão foi elevada e se esperou nova estabilização (Figura 3.11). Este procedimento de aumento da vazão foi realizado em cinco estágios, ou seja, 4 incrementos de aumento da vazão após o ensaio inicial.

Os valores obtidos foram plotados em gráficos de vazão (Q) por tempo, para a interpretação dos dados através da solução analítica de Thiem (Thiem, 1906), possibilitando a obtenção dos valores de transmissividade de cada intervalo ensaiado.



Figura 3.11: Arranjo dos equipamentos utilizados durante o ensaio de perda d'água sob pressão. (a) montagem dos obturadores no poço tubular, com o obturador superior em destaque; (b) arranjo utilizado durante o teste de perda d'água sob pressão, em destaque a válvula para controle da vazão e aumento de acordo com o estágio do teste e medidor da vazão estipulada.

### 3.7. Teste de Bombeamento

O teste de bombeamento foi realizado no poço tubular PT-B, anteriormente à retirada da bomba do poço e sua limpeza, ou seja, antes dos estudos de perfilagem, utilizando-se da própria bomba instalada no poço.

O teste consistiu no bombeamento contínuo do poço tubular PT-B durante 23 horas, inicialmente a uma vazão de 51,3 m<sup>3</sup>/h durante uma hora e de 12,0 m<sup>3</sup>/h nas 22 horas seguintes. Durante o teste a vazão foi controlada pela medição periódica

com um galão graduado e o rebaixamento do poço foi monitorado por meio de medidor de nível de água com sonda elétrica. A vazão foi reduzida durante o teste pela dificuldade de destinação do volume de água gerado, apesar do nível dinâmico do poço ter se estabilizado com a vazão inicial.

Simultaneamente ao bombeamento, o poço tubular PT-A e outros três poços de monitoramento rasos (PM-06, PM-25, PM-26) próximos ao poço tubular PT-B tiveram suas cargas hidráulicas monitoradas por meio de medidores automáticos de pressão (*level logger*) modelo 3001 Solinst, com precisão de 0,05 atm. Após as 23 horas, a bomba foi desligada e a recuperação do nível de água do poço tubular PT-B foi monitorada até a sua total recuperação.

Após a conclusão do teste, os medidores automáticos de pressão foram retirados dos poços de monitoramento e seus dados de pressão foram exportados. Estes dados foram normalizados para a obtenção das cargas hidráulicas dos poços e os dados adquiridos foram tratados em planilhas. Por fim, a curva de rebaixamento do poço tubular bombeado, a vazão de bombeamento e a carga hidráulica dos poços monitorados foram plotadas em gráficos e analisadas.

## 4. ARTIGO CIENTÍFICO

### 4.1. Título

MODELO CONCEITUAL HIDROGEOLÓGICO DE UM CASO DE CONTAMINAÇÃO DO AQUÍFERO FRATURADO POR SOLVENTES CLORADOS NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.

### 4.2. Resumo

A construção de um modelo conceitual hidrogeológico bem desenvolvido é fundamental no processo de investigação da contaminação de aquíferos fraturados, sendo também importante em áreas contendo manto de intemperismo, que representa o primeiro reservatório aquífero em conexão hidráulica com o meio de porosidade por fraturas da rocha sã, subjacente. Este trabalho visa contribuir com o desenvolvimento deste tema, apresentando os resultados obtidos em um estudo de caso que utilizou diversas ferramentas de investigação de poços tubulares no aquífero fraturado, como os imageadores acústico (ATV) e ótico (OTV), medidores de vazão tipo *heat pulse flowmeter* (HPF) e obturadores. No estudo, dois poços tubulares foram perfilados, fornecendo dados estruturais para a caracterização do aquífero fraturado, enquanto os dados do HPF e dos obturadores forneceram dados hidráulicos e possibilitaram a definição de trechos para a coleta de amostras discretas de água subterrânea para as análises químicas. Teste de bombeamento e teste hidráulico do tipo *cross-borehole* com o uso do HPF foram realizados para a avaliação das conexões entre os aquíferos e os poços tubulares. Na área dois aquíferos foram identificados: (1) o aquífero do manto de intemperismo, livre, de porosidade intergranular e delgado, situado sobre (2) o aquífero fraturado, de natureza livre a semiconfinado, de porosidade secundária, formado por um granito foliado. No aquífero fraturado quatro grupos de fraturas foram identificados, sendo os Grupos I e II, de direção N60W a N60E e mergulhos inferiores a 40°, os mais importantes para o fluxo. Os testes hidráulicos demonstraram conexão entre o aquífero do manto de intemperismo e o aquífero fraturado por fraturas rasas do Grupo I que possuem alta transmissividade, transportando o contaminante. Já a conexão entre as fraturas interceptadas pelos poços tubulares ocorre predominantemente pelas fraturas mais profundas (>140 metros de profundidade) do Grupo II, que representam uma segunda zona de alta transmissividade, conectando hidráulicamente os poços e possibilitando o transporte dos contaminantes pelo aquífero fraturado.



### **4.3. Introdução**

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), Brasil, é um território que se tornou intensamente urbanizado e industrializado a partir da década de 1950. Seu processo de industrialização gerou situações ambientais complexas, pois não foi acompanhado por um gerenciamento ambiental apropriado, tanto pela falta de conhecimento técnico quanto pela falta de fiscalização à época. A ausência deste gerenciamento, sobretudo de produtos e efluentes tóxicos (hidrocarbonetos de petróleo e compostos organoclorados), gerou o descarte inapropriado de produtos químicos em solo e água. Consequentemente, múltiplas áreas industriais foram contaminadas e se encontram assim, afetando o uso dos aquíferos, que em regiões urbanizadas, são importantes para o abastecimento humano (Hirata et al. 2012, Bertolo et al., 2015, Bertolo, 2017, Barbosa et al., 2017).

Atualmente, de acordo com a legislação do estado de São Paulo, todas as áreas com potencial de contaminação devem passar pelo processo de gerenciamento ambiental para a obtenção de sua licença de operação (CETESB, 2017; 2021). Contudo, apesar desta exigência que inclui diversas áreas no processo de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC), a fiscalização por parte do órgão ambiental é um desafio devido à extensão e a quantidade de empreendimentos na RMSP. Isto possibilita a inércia por parte dos proprietários e causa um desconhecimento de inúmeras áreas contaminadas por parte do Estado, afetando diretamente o gerenciamento do suprimento de água subterrânea para o consumo humano na RMSP.

Outrossim, na maioria dos casos, dentro do processo de GAC as investigações são voltadas para o aquífero freático raso, muitas vezes priorizando a avaliação dos riscos à saúde humana provenientes da intrusão de vapores. Assim, os níveis aquíferos mais profundos, principais responsáveis pelo abastecimento de água, são desconsiderados em muitos casos. Este fato ocorre, pois, a Decisão de Diretoria CETESB nº038/2017/C, que rege o processo de GAC, trata genericamente sobre a investigação dos níveis aquíferos mais profundos, ou seja, abre espaço para a interpretação da necessidade de investigação e não estabelece fundamentos a serem exigidos pelo órgão ambiental. Por conta disto, diversos casos são aprovados mesmo com modelos conceituais que desconsideram o aquífero fraturado quando ele é passível de se encontrar impactado.

Apoiada nesta falta de exigências específicas, a cultura de investigação do meio fraturado não foi gerada, mas este conceito vem mudando. Atualmente as percepções de custos exorbitantes, falta de equipamentos e métodos aplicáveis e ausência de profissionais capacitados no tema vem sendo desmistificadas. O avanço da tecnologia no setor possibilitou o acesso a equipamentos confiáveis e compactos disponíveis em território brasileiro, facilitando a logística e reduzindo os custos de investigação. Ao mesmo tempo, uma série de profissionais se especializaram no tema, levando a discussão dos riscos à saúde humana associados a contaminação do aquífero fraturado para dentro do processo de GAC.

Devido à importância deste tema, diversos estudos vêm sendo conduzidos na RMSP, em especial nos últimos 15 anos, como Alves, 2008; Fernandes et al., 2016; Bertolo, 2017; Fanti et al., 2017; Barbosa et al., 2017; Lojkasek-Lima, 2018; Barbosa, 2020; Fiume et al., 2020; Pino et al., 2021 e Hart et al., 2022. Internacionalmente, o tema é abordado desde o início da década de 1980, com o desenvolvimento de ferramentas e métodos (Paillet et al., 1985; Lau et al., 1987; Morin et al., 1988; Paillet & Ollila, 1994; Lane, 2002; Williams & Paillet, 2002; Francese et al., 2009; Paillet et al., 2012; Busse et al., 2016; Hsu et al., 2019), com destaque para a metodologia DFN-M, de investigação de meios fraturados contaminados (Parker et al., 2012).

A inclusão dos níveis aquíferos mais profundos e do aquífero fraturado é viável e primordial na construção de modelos conceituais mais representativos. Modelos conceituais que representam uma fotografia da área de estudo, que ilustra as informações físicas e químicas obtidas durante a investigação de maneira sucinta e estruturada, assim como suas incertezas.

Neste cenário, este estudo visa descrever um caso de contaminação de aquífero fraturado por compostos organoclorados, através da construção do seu modelo conceitual hidrogeológico. Para tanto, ferramentas de perfilagem foram utilizadas, como os imageadores acústico (*Acoustic Televiewer* - ATV) e ótico (*Optical Televiewer* - OTV) e o medidor de vazão do tipo *flowmeter* (*Heat Pulse Flowmeter* - HPF). Além da aplicação de métodos de interpretação estrutural, testes hidráulicos em um único poço e entre dois poços (*cross-borehole test*) (Paillet, 1993; Williams & Paillet, 2002; Paillet et al., 2012) e da amostragem discreta de água subterrânea com obturadores.

Inserida no contexto industrial, a área de estudo possui embasamento raso, com um manto de intemperismo delgado, formando um aquífero intergranular pouco espesso. Devido à presença de contaminação por compostos organoclorados no

aquífero freático raso e às características geológicas e hidrogeológicas da área, o aquífero fraturado foi impactado, demonstrando que apenas a investigação do aquífero intergranular seria insuficiente para a construção de um modelo conceitual hidrogeológico sólido. Posto isto, o estudo visa, através deste modelo, demonstrar a viabilidade e importância da investigação do aquífero fraturado, contribuindo para o entendimento, gerenciamento e evolução das pesquisas sobre a problemática da contaminação da água subterrânea de poços tubulares por compostos organoclorados

#### **4.4. Área de Estudo**

##### **4.4.1. Geologia e hidrogeologia**

A área de estudo se localiza na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), na cidade de Diadema. Geologicamente se insere no contexto da Bacia Sedimentar de São Paulo, com sedimentos Cenozoicos sobre o embasamento cristalino Pré-Cambriano do Complexo Embu (Coutinho, 1972) e uma série de intrusões de corpos granitóides. O complexo é delimitado pelas falhas de Taxaquara (Hennies et al., 1967) e Rio Jaguari (Cavalcante & Kaefer, 1974) à norte, e pela falha de Cubatão (Coutinho, 1972) à sul (Figura 4.1). É composto principalmente por rochas metamórficas e granitoides (Coutinho, 1972; Hasui *et al.*, 1976; Juliani, 1992) que, associadas ao clima tropical úmido da região, geram perfis de intemperismo de dezenas de metros sobre o embasamento (Vaz, 1996).

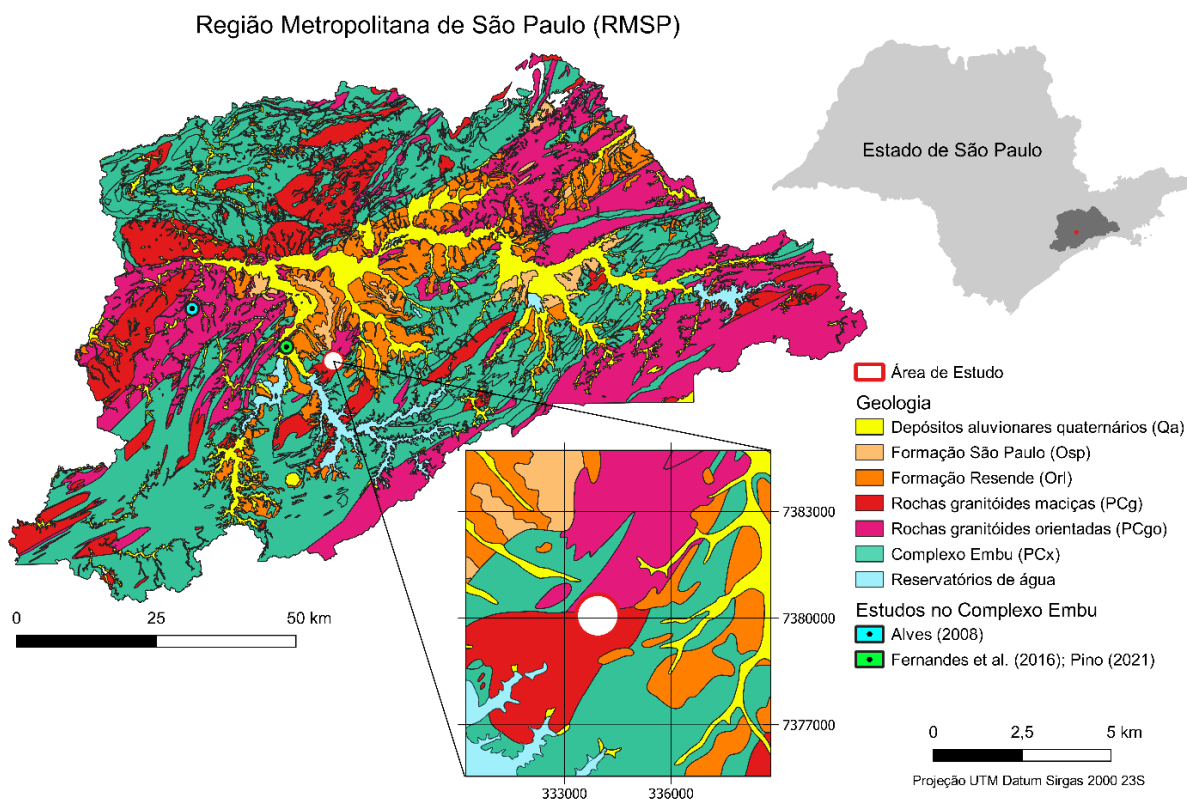


Figura 4.1: Geologia da RMSP, localização da área de estudo e dos estudos realizados no aquífero fraturado no contexto do Complexo Embu.

Regionalmente, a área de estudo está situada sobre suítes graníticas maciças a orientadas, sendo estas, regionalmente, hornblenda e/ou biotita gnaisses bandados, com composição granítica a granodiorítica (Coutinho, 1972). Com base nas observações de campo e considerando a classificação de Vaz (1996) e Vaz & Gurgueira (2017) para solos de alteração de rocha, cinco unidades geológicas são definidas na área: solo eluvial, solo de alteração de rocha, rocha alterada mole, rocha alterada dura e rocha sã (Figura 4.2)

Geologia	Descrição	Espessura Mínima (m)	Espessura Máxima (m)	Observações
Solo Eluvial (SE)	Argila, argila arenoso e silte de coloração vermelha a marrom, com porções cinza, bege e ocre. Possui superficialmente solo orgânico e fragmentos de construção civil em alguns pontos.	0,2	2,3	É observado SE mobilizado (Aterro)
Solo de Alteração de Rocha (SA)	Argila, argila siltosa e argila arenosa micácea, cor variegada predominando vermelho arroxeado a bege claro, apresenta foliação incipiente na base e predomínio de argilominerais.	0,4	14,7	Perfurado por sondagem a percussão manual
Rocha Alterada Mole (RAM)	Granito com granulometria média, alterações em laranja, roxo e vermelho devido a alteração dos minerais originais da rocha (feldspato e biotita) e presença de quartzo. Ocorrem bolsões de porções menos alteradas e a estruturação torna-se mais evidente com o aumento da profundidade, a medida que se avança para a rocha sã	0,1	3,8	Resistente a sondagem por percussão manual e perfurado por sondagem mecanizada
Rocha Alterada Dura (RAD)	Granito composto por plagioclásio, quartzo, feldspato e biotita. Possui granulometria média, foliação gnáissica e índice de minerais máficos entre 10 e 15%. Localmente foram observados índices entre 2 e 5%, representando bolsões félsicos do embasamento. A rocha possui coloração acinzentada e apresenta minerais oxidados com coloração laranja na RAD.	0,1	0,3	Impenetrável a sondagem por percussão manual e muito resistente a sondagem mecanizada
Rocha Sã		-	-	Impenetrável a sondagem por percussão manual e sondagem mecanizada

O diagrama à direita da tabela mostra uma coluna vertical de amostras geológicas. As amostras são rotuladas de cima para baixo: SE (Solo Eluvial), SA (Solo de Alteração de Rocha), RAM (Rocha Alterada Mole) e RAD (Rocha Alterada Dura). Abaixo da amostra RAD, há uma escala vertical com marcas em 0 cm, 5 cm, 10 cm e 15 cm.

Figura 4.2: Unidades geológicas identificadas na área de estudo e sua descrição em relação à geologia, espessura e resistência ao método de sondagem empregado.

O solo eluvial (SE), último estágio do intemperismo das rochas granitóides da área, é homogêneo, pouco espesso e representa apenas a cobertura mais superficial do perfil geológico, que na porção inconsolidada é predominantemente composto pelo solo de alteração de rocha (SA), estágio de intemperismo anterior ao SE (Vaz, 1996; Vaz & Gurgueira, 2017).

A rocha alterada mole (RAM) e dura (RAD) se diferenciam pela sua resistência ao método de sondagem e pelo grau de intemperismo presente, uma vez que mineralogicamente possuem a mesma proveniência. Ambas foram descritas com o auxílio de um afloramento presente na área.

De acordo com o modelo topográfico e do topo da RAD (Figura 4.3), gerado a partir das sondagens realizadas na área, o topo rochoso está presente entre profundidades de 0,5 a 12,0 metros, aflorando em dois pontos na área de estudo, observados nos perfis E-F e G-H da Figura 4.3.

Em geral, o SA e a RAM possuem predominantemente porosidade intergranular e permeabilidade dupla, ou seja, permeabilidade primária no SA e transicional na RAM. Esta porção representa o aquífero do manto de intemperismo, intergranular, livre e com condutividade hidráulica entre  $10^{-6}$  e  $10^{-7}$  m/s, obtida com ensaios do tipo slug test nos poços de monitoramento raso. O seu fluxo é predominantemente horizontal, com sentido SSE influenciado pelos topos e vales presentes na região (Figura 4.4).

A RAD possui porosidade dupla e permeabilidade predominantemente secundária, enquanto a rocha sã apresenta porosidade simples e permeabilidade secundária. Assim, estas unidades representam o aquífero fraturado, de natureza livre a localmente semiconfinada. Regionalmente, estudos realizados no contexto do Complexo Embu (Figura 4.1) indicam que as fraturas mais influentes para o fluxo da água subterrânea no aquífero fraturado possuem direção N-S (Alves, 2008), NE-SW (Alves, 2008; Pino, 2021) e NNE-SSW (Fernandes et al., 2016).

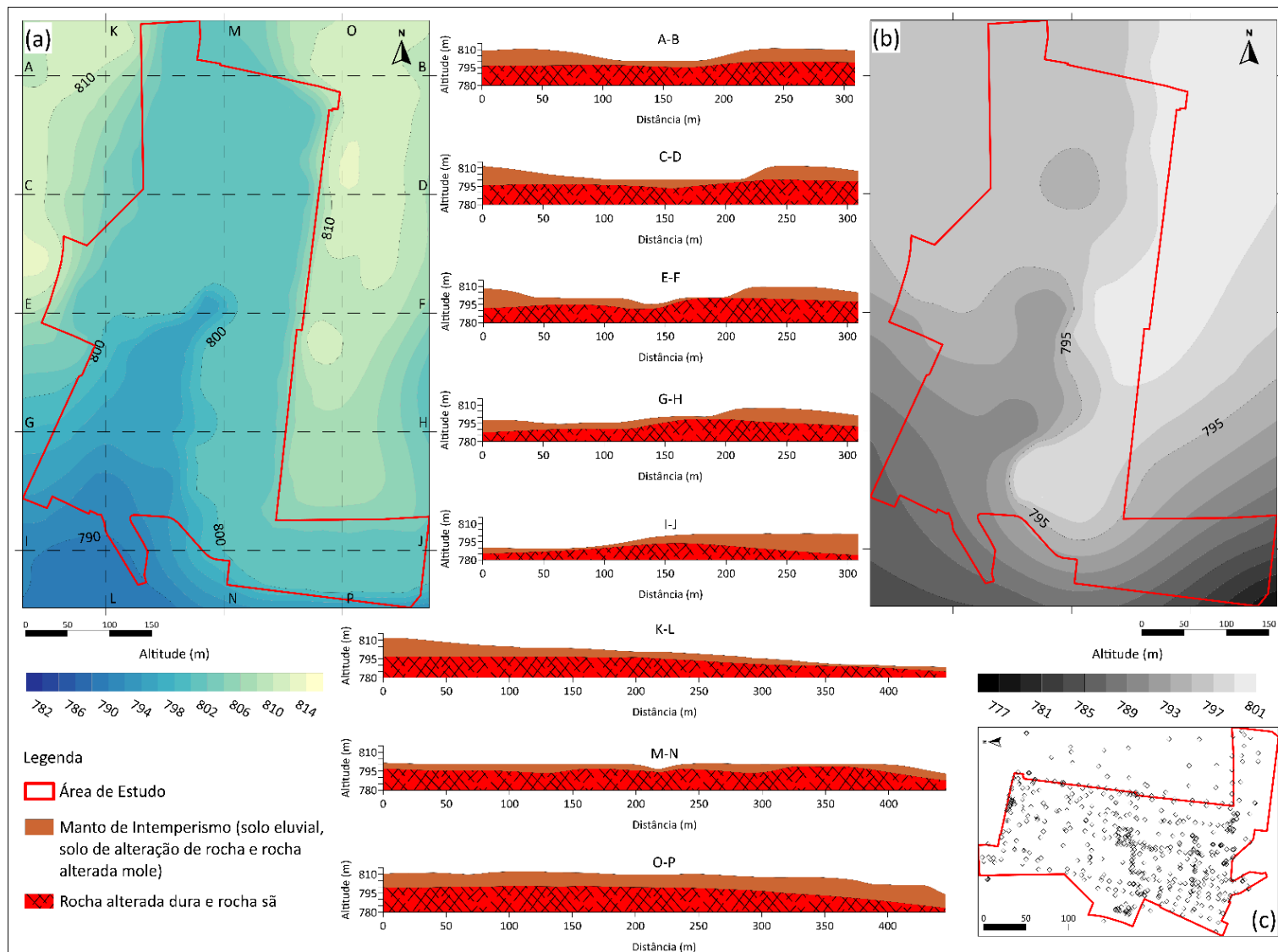


Figura 4.3: Modelos topográficos da superfície da área de estudo (a) e do topo da rocha alterada dura (b). Em (c), a localização da malha de pontos utilizados na construção dos modelos. Ao centro, seções geológicas esquemáticas da área (A-B a O-P), construídas com base nos modelos gerados.

#### 4.4.2. Histórico ambiental

O uso industrial da região de estudo remonta à década de 1960, em que diversos produtos químicos eram manuseados e descartados de forma inadequada para os padrões atuais. Neste contexto, o uso de solventes clorados foi responsável por contaminar o solo e o aquífero do manto de intemperismo. Além disso, concentrações traço de compostos organoclorados foram identificadas em dois dos três poços tubulares de abastecimento da planta industrial (PT-A e PT-B, Figura 4.4), causando as suas interdições.

Os compostos organoclorados possuem diversos usos, mas são geralmente utilizados como desengraxantes e solventes industriais. São altamente tóxicos mesmo em baixas concentrações em solo e água subterrânea, podendo contaminar grandes áreas, causando risco ao meio ambiente e à saúde humana (Kueper *et al.*, 2003). Na área de estudo e seu entorno, sobretudo na região de montante à leste, os solventes clorados foram utilizados no processo produtivo de tintas, esmaltes, lacas, vernizes, impermeabilizantes, secantes, desengraxantes, removedores, decapantes e aditivos de banho eletrolítico.

As investigações ambientais tiveram início em 2012, com o objetivo de identificar e caracterizar as fontes e a contaminação no solo e no aquífero do manto de intemperismo. Para tanto, ao longo da investigação, 97 sondagens foram realizadas e 62 poços de monitoramento rasos foram instalados para delimitar a contaminação neste aquífero.

No solo, nenhum centro de massa relacionado aos compostos organoclorados foi identificado. Já na água subterrânea, existem três centros de massa no aquífero do manto de intemperismo (Figura 4.4), associados ao uso pretérito e difuso de solventes clorados na planta industrial, à presença de uma tancagem e à utilização destes compostos na área vizinha. No centro de massa à norte da área, os compostos tetracloroetano (PCE), tricloroetano (TCE) e cis-1,2-dicloroetano (cis-1,2-DCE) foram detectados, assim como a sudeste, com exceção do cis-1,2-DCE. Já no centro de massa ao centro sul da área, os compostos clorofórmio, cloreto de vinila (CV) e etenos foram detectados, além dos presentes nos demais pontos.



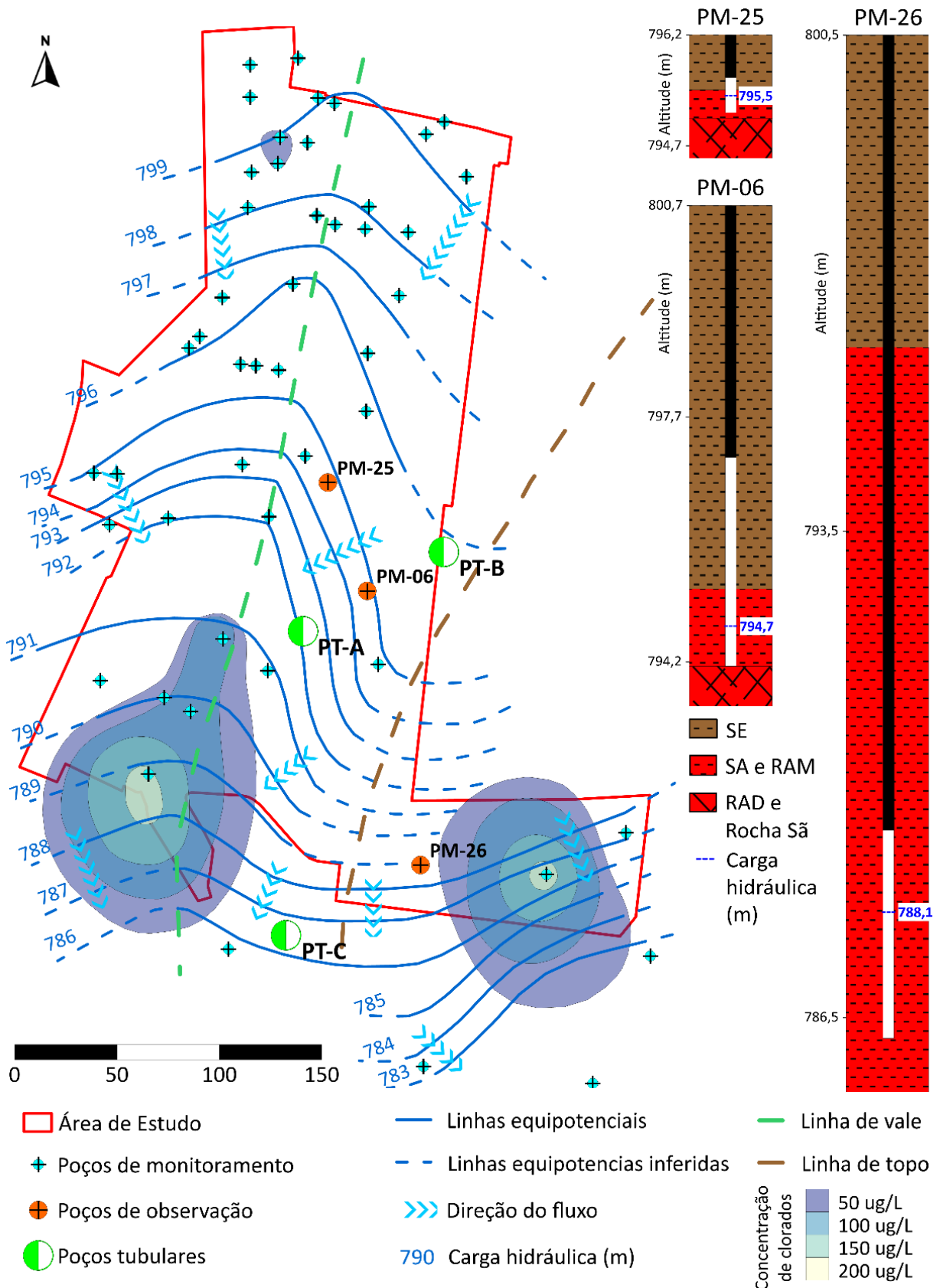


Figura 4.4: Mapa potenciométrico do aquífero do manto de intemperismo, com a localização das plumas de compostos organoclorados detectadas na área de estudo. Destaca-se a localização dos poços tubulares presentes e utilizados no estudo (PT-A e PT-B) e não utilizado (PT-C) O mapa também inclui a localização e os perfis dos poços de monitoramento rasos acompanhados durante o teste de bombeamento do poço tubular PT-B.

Devido ao cenário geológico, à contaminação da área e ao histórico de detecção de compostos organoclorados nos poços tubulares PT-A e PT-B, instalados no aquífero fraturado, a adoção de estratégias de investigação deste meio foi necessária. Desta forma, técnicas de investigação e caracterização das fraturas foram empregadas para a construção de um modelo conceitual hidrogeológico do aquífero fraturado, dando suporte para a investigação e gerenciamento da área.

## **4.5. Métodos**

### **4.5.1. Análise de Lineamentos**

A análise de lineamentos foi realizada sobre modelo digital de elevação (MDE) disponível no banco de dados do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2022) e obtido pelo levantamento dos satélites da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM).

Através das ferramentas de SIG do *software* QGis, mapas de sombreamento com base no MDE foram elaborados. Nestes mapas os lineamentos morfoestruturais puderam ser vetorizados. Para tanto, foram adotados os seguintes critérios:

- Escala de visualização de 1:30.000;
- Consideradas feições visíveis, evitando interpolação;
- Mapa de sombreamento com incidência de luz a 45° (nordeste), ressaltando estruturas com direção NW-SE
- Mapa de sombreamento com incidência de luz a 315° (noroeste), ressaltando estruturas com direção NE-SW; e
- Ângulo vertical de 45° em relação ao solo para incidência da iluminação.

Após a vetorização dos lineamentos, eles foram subdivididos e classificados em seis intervalos: NNE (N01E – N20E); NE (N21E – N70E); ENE (N71E – N89E); NNW (N01W – N20W); NW (N21W – N70W); WNW (N70W – N89W); e seus padrões foram analisados por meio de diagrama de roseta no *software* GeoRose.

### **4.5.2. Perfilagens Ótica (OTV) e Acústica (ATV)**

Para a investigação do aquífero fraturado, perfilagens ótica (OTV) e acústica (ATV) foram realizadas após a filmagem dos poços tubulares PT-A e PT-B. A filmagem, como suporte as demais investigações, foi realizada com a sonda portátil R-Cam 1300XS da Laval Underground Surveys com o objetivo de observar as

características da rocha que compõe o aquífero fraturado e identificar possíveis interferências e zonas de maior adensamento de fraturas.

Na OTV foi utilizada a sonda QL40-OBI-2G da Advanced Logic Technology (ALT), a aquisição de dados foi em sentido ascendente, iniciando do fundo dos poços, com intervalo de registro de 0,4 mm e velocidade de 2,0 m/min (Barbosa, 2020). A utilização desta sonda teve como objetivo a identificação de fraturas e seus aspectos estruturais (atitudes e abertura) nos poços, inclusive com a identificação visual de feições, já que o produto obtido é uma imagem colorida e orientada de 360° em alta resolução da parede do poço/furo.

A perfilagem acústica possui objetivos semelhantes, a identificação de fraturas e dos seus aspectos estruturais somado a medição do calibre do poço. Para tanto, foi utilizada a sonda QL40-ABI-2G da fabricante ALT, com aquisição de dados em sentido ascendente, iniciando do fundo do poço, com resolução de 144 pontos por volta, intervalo de 4,0 mm entre cada registro e velocidade de deslocamento da sonda de 4,0 m/min (Barbosa, 2020).

#### **4.5.3. Interpretação dos dados estruturais**

Os dados obtidos durante as perfilagens dos poços tubulares foram inseridos e tratados no software WellCad v.5.5. As fraturas identificadas através das perfilagens acústica e ótica foram traçadas e classificadas de acordo com o seu ângulo e abertura aparente. Fraturas aparentemente fechadas, com abertura aparente menor que 10 mm, foram traçadas em azul; já as fraturas aparentemente abertas, com abertura aparente maior que 10 mm, foram traçadas em vermelho.

Os dados estruturais obtidos são apresentados em anotação do tipo Clar e foram plotados em projeção polar em estereogramas no software WellCad v.5.5. Além dos estereogramas, foram gerados diagramas de roseta para a direção das fraturas, e histogramas com a densidade dos mergulhos observados, para definição dos diferentes grupos de fraturas. Para a correção do viés de orientação e a correta análise da densidade e espaçamento das fraturas, foi utilizado o método de Terzaghi (1965), com a aplicação direta pelo software WellCad v.5.5 que considerando a orientação do poço. Após isto, os grupos de fraturas foram definidos com base nas suas similaridades, auxiliando na definição das fraturas mais importantes para o fluxo.

#### **4.5.4. Perfilagens de fluxo com HPF**

Para a perfilagem de fluxo foi utilizada a sonda *Heat Pulse Flowmeter* (HPF) modelo HPF-2293 da Mount Sopris Instruments (MSI), capaz de quantificar vazões entre 0,1 e 4,0 L/min. Ao longo dos perfis dos poços, todos os trechos considerados prioritários foram ensaiados de acordo com os procedimentos descritos em Barbosa (2020). Assim, todos os trechos com indícios de fluxo, fraturas com abertura aparente e trechos com elevado grau de fraturamento foram ensaiados.

Os ensaios com a sonda HPF foram realizados em regime de fluxo ambiente e induzido por bombeamento/injeção do poço, visando a identificação de zonas de entrada e saída de água e da conexão entre fraturas (Paillet et al., 1987, 2012; Williams & Paillet 2002; Le Borgne et al., 2004). De acordo com o método, o primeiro ensaio realizado foi em regime ambiente (Paillet, 1993; Barbosa, 2020). Em seguida, as medições de fluxo no poço tubular PT-B foram executadas com a injeção constante de água a uma vazão de 3,7 L/min, com o objetivo de estimular a ativação de fluxo em fraturas mais transmissivas e que apresentam fluxos pequenos ou nulos em condições ambiente (Hsu et al., 2019). Adicionalmente, as medições de fluxos também foram realizadas no poço tubular PT-B com o estímulo por bombeamento do poço tubular PT-A a uma vazão de 500 L/min.

No poço tubular PT-A, após as medições em condição ambiente, o fluxo induzido foi medido com o bombeamento do próprio poço a uma vazão constante de 3,7 L/min. O objetivo dos ensaios com a sonda HPF foi identificar as condições e velocidade de fluxo entre as diversas fraturas dos poços estudados, determinando suas principais zonas de entrada e saída de água e conexões hidráulicas.

#### **4.5.5. Teste hidráulico *cross-borehole* com HPF**

Após a identificação das principais zonas de fluxo nos poços tubulares com a utilização do HPF, o teste hidráulico do tipo *cross-borehole* foi realizado para caracterizar a conexão das fraturas entre os poços tubulares PT-A e PT-B.

O teste hidráulico do tipo *cross-borehole* possibilita medir o fluxo entre o poço de bombeamento e o de observação em uma condição de estresse do aquífero (Paillet, 1993). Este teste permite definir e caracterizar o fluxo da água subterrânea entre os poços tubulares, e entender como cada fratura está conectada no cenário de fluxo do aquífero (Paillet, 1993; Williams & Paillet, 2002; Le Borgne et al., 2004).

O método foi aplicado entre os poços tubulares PT-A e PT-B. O teste consistiu na injeção constante de água no poço tubular PT-B e o monitoramento da resposta a esta injeção em certos intervalos do poço tubular PT-A, por meio da sonda HPF. Foram testados cinco intervalos (57, 73, 173, 179 e 193 metros), definidos com base nas variações de fluxo observadas durante a perfilagem dos poços com a sonda HPF.

Para o teste, a sonda HPF foi posicionada no intervalo pré-definido no poço tubular PT-A. Deu-se então início à injeção de água no poço tubular PT-B, a uma vazão constante de 50,0 L/min. Ao mesmo tempo, a sonda HPF foi acionada realizando medidas sequenciais até a estabilização do fluxo. Após a estabilização observada pelo HPF, a injeção no PT-B foi cessada e o intervalo foi medido até nova estabilização. O procedimento foi realizado em cada um dos intervalos pré-definidos.

Os dados obtidos foram tratados, gerando gráficos de tempo por fluxo observado no HPF. Neste gráficos é possível identificar o tempo de resposta do pulso de injeção em cada um dos intervalos ensaiados. A interpretação conjunta dos gráficos em intervalos distintos pode mostrar alterações no fluxo entre eles permitindo a identificação de zonas de entrada ou saída de água nos poços.

#### **4.5.6. Teste hidráulico com obturadores**

Com base nas perfilagens realizadas, seis intervalos (25,5–26,5, 100,5–101,5, 104,5–105,5, 141-142, 147-180 e 149-180 metros) do poço tubular PT-B foram selecionados para a execução de teste hidráulico com o auxílio de um par de obturadores modelo P5-9, da RST Instruments. O teste hidráulico de perda d'água sob pressão foi realizado para se obter a transmissividade do aquífero no trecho entre os obturadores.

Seguindo a metodologia e o arranjo (Figura 4.5) expostos por Barbosa (2020), em cada trecho os obturados foram inflados individualmente e as relações de carga hidráulica entre os níveis isolados foram observadas. Em seguida, o teste hidráulico de perda d'água sob pressão foi iniciado, seguindo o procedimento descrito por Barbosa (2020), que consiste, basicamente, na injeção de uma vazão constante de água até a estabilização da pressão do intervalo em cinco estágios. A variação das cargas hidráulicas foi medida em função do tempo e os resultados foram interpretados pela solução de Thiem (Thiem, 1906).

Além disso, no poço tubular PT-A em que não foi possível o ensaio com obturadores, foi utilizado o *software* “*Flow-Log Analysis of Single Holes - R*” (FLASH-

R) (Barbosa et al., 2020), atualização baseada no *software* desenvolvido por Day-Lewis et al. (2011) e disponibilizado pelo Serviço Geológico Americano (*United States Geological Survey – USGS*). Com base nas formulações desenvolvidas por Paillet (1998), o *software* realiza simulações de fluxo ambiente e induzido, comparando-as e possibilitando estimar parâmetros como a transmissividade e carga hidráulica de cada zona de fluxo testada (Barbosa, 2020).

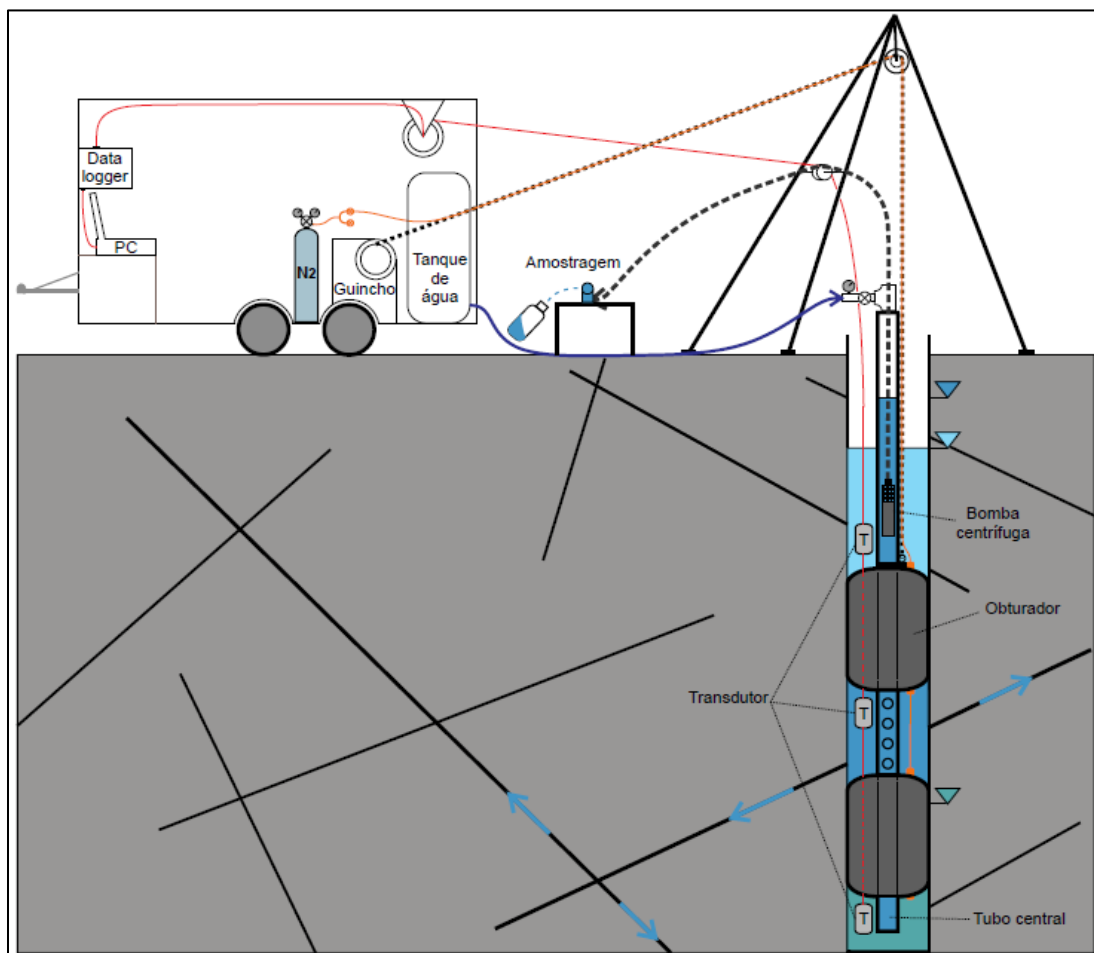


Figura 4.5: Arranjo esquemático do sistema utilizado para a realização da amostragem discreta e do ensaio hidráulico de perda d'água sob pressão, ambos com a utilização de obturadores (Barbosa, 2020).

#### 4.5.7. Teste de bombeamento

Para a análise da conexão entre os aquíferos presentes na área, foi executado um teste de bombeamento contínuo no poço tubular PT-B durante 23 horas, a uma vazão inicial de 51,3 m<sup>3</sup>/h durante uma hora e de 12,0 m<sup>3</sup>/h nas 22 horas seguintes. A vazão foi reduzida durante o teste pela dificuldade de destinação do volume de água gerado, apesar de o nível dinâmico do poço ter se estabilizado com a vazão inicial.

Simultaneamente, os poços de monitoramento rasos PM-06, PM-25 e PM-26 (Figura 4.4), assim como o poço tubular PT-A, tiveram suas cargas hidráulicas monitoradas por meio de medidores automáticos de pressão (*level logger*), modelo 3001 Solinst, com precisão de 0,005 m. Após as 23 horas de bombeamento, o nível d'água do poço tubular PT-B foi monitorado até a sua recuperação total. Após a conclusão do teste, os dados adquiridos foram tratados e as curvas de rebaixamento da carga hidráulica dos poços monitorados analisadas.

#### **4.5.8. Amostragem discreta de água subterrânea com obturadores**

Utilizando os mesmos intervalos isolados e arranjo adotado para o teste hidráulico com obturadores (Figura 4.5), seis amostras discretas de água subterrânea foram coletadas no poço tubular PT-B. Em cada intervalo, a coleta das amostras de água subterrânea precedeu as demais atividades, evitando qualquer tipo de contaminação cruzada.

Após a estabilização da carga hidráulica em cada intervalo, a amostragem discreta foi realizada por uma bomba centrífuga modelo MP1 da Grundfos, capaz de trabalhar em baixas vazões. As amostras foram coletadas em superfície, acondicionadas em frascos apropriados entre 0 e 4°C e enviadas ao laboratório em menos de 24 horas para análise de compostos orgânicos voláteis (VOC) e semivoláteis (SVOC).

### **4.6. Resultados**

#### **4.6.1. Poços tubulares avaliados**

O poço tubular PT-A apresenta profundidade de 196,5 metros, revestimento metálico até a profundidade de 8,0 metros e nível de água em 38,1 metros (Apêndice A). Sua geologia é totalmente composta por um granito foliado, consonante com o indicado pela geologia regional.

As zonas mais alteradas são vistas no topo, junto ao contato com o revestimento, provavelmente se tratando da transição entre a RAD e a Rocha Sã, e junto às fraturas de maior abertura aparente, que são bem distribuídas ao longo do perfil.

Geologicamente, o poço tubular PT-B apresenta o mesmo litotipo encontrado no PT-A, com profundidade de 180 metros, segundo o histórico levantado. Contudo, só foi possível perfilá-lo até 155 metros devido à presença de uma cavidade causada

por uma quebra da parede do furo durante a sua perfuração, que impossibilitou o avanço das ferramentas.

O poço tubular PT-B possui revestimento até a profundidade de 10 metros e seu nível de água se encontra em 50,6 metros (Apêndice A). Assim como no PT-A, são encontradas zonas mais alteradas próximas às fraturas de maior abertura aparente e em porções mais rasas.

#### **4.6.2. Análise estrutural**

Com base nas perfilagens acústica e ótica, as fraturas presentes nos dois poços tubulares investigados foram identificadas (Apêndice A), assim como suas profundidades, atitudes (direção e mergulho) e aberturas aparentes. Estes dados foram tratados em diagramas de roseta, histogramas e estereogramas e divididos em diferentes grupos. As fraturas identificadas com abertura aparente maior que 10 mm são representadas em vermelho nos estereogramas e as com abertura aparente menor que 10 mm em azul. A Figura 4.6 apresenta os dados obtidos para os poços tubulares PT-A e PT-B.

No PT-A, 153 fraturas foram observadas, sendo 100 com abertura aparente <10 mm (65%) e 53 com abertura aparente >10 mm (35%). As fraturas com abertura aparente <10 mm apresentam direção predominante entre N e N60E com mergulhos entre 10 e 30°; as com abertura aparente >10 mm entre N20W e N com mergulhos entre 20 e 40°. Três adensamentos de fraturas (Apêndice A) são observados entre as profundidades de 30 e 70 metros, 80 e 120 metros e 140 e 180 metros. É possível identificar pelo menos três grupos de fraturas:

- Grupo 1A: fraturas sub-horizontais com direção entre N60W e N60E com mergulhos inferiores 40° e sentido entre N30E e S30E. Ocorre tanto nas fraturas com abertura aparente <10 mm como nas com abertura aparente >10 mm ao longo de todo o perfil, com predominância entre 30 e 70 metros de profundidade. São as fraturas observadas de maior ocorrência.
- Grupo 2A: fraturas sub-horizontais com direção predominante entre N60W e N60E com mergulhos inferiores a 30° e sentido entre N30W e S30W. São predominantemente fraturas com abertura aparente <10 mm e são ausentes até os primeiros 70 metros. Passam a ocorrer no intervalo de 80 a 120 metros, mas se adensam no intervalo de 140 a 180 metros.



- Grupo 3A: fraturas subverticais com direção predominantes W-E, possui mergulho acima de 70° e sentido entre N15W e N30E. São bem distribuídas em relação a abertura aparente das fraturas e pouco densas ao longo de todo o perfil, possivelmente associado a subamostragem dessas fraturas em estruturas verticais. Os intervalos basais (80 a 120 e 140 a 180 metros) concentram as fraturas deste grupo.

No poço tubular PT-B, 188 fraturas foram observadas, sendo 145 com abertura aparente <10 mm (77%) e 43 com abertura aparente >10 mm (23%). As fraturas com abertura aparente <10 mm apresentam direção predominante entre a faixa N60E e NE com mergulhos entre 10 e 30°; as com abertura aparente >10 mm possuem a mesma direção e mergulhos entre 20 e 30°. As fraturas são bem distribuídas ao longo do perfil (Apêndice A). É possível identificar 7 grupos de fraturas:

- Grupo 1B: fraturas sub-horizontais com direção entre N e N60E com mergulhos inferiores a 40° e sentido entre NE e S30E. São predominantemente com abertura aparente <10 mm e ocorrem nos intervalos de profundidade de 50 a 70 metros e 90 a 110 metros.
- Grupo 2B: fraturas sub-horizontais com direção entre N60W e N30W com mergulhos inferiores a 30° e sentido entre N30E e N60E. São predominantemente fraturas com abertura aparente <10 mm e ocorrem apenas no intervalo de profundidade entre 70 e 90 metros.
- Grupo 3B: fraturas sub-horizontais com direção entre N60W e N60E e mergulhos inferiores a 30° com sentido entre N30W e N30E. Ocorrem nas fraturas com abertura aparente <10 e >10 mm e exclusivamente nas profundidades inferiores, abaixo de 110 metros.
- Grupo 4B: fraturas com direção entre W-E e N45E e mergulho entre 30 e 50° com sentido entre N45W e N. O grupo possui menor concentração de fraturas que os anteriores, mas possui fraturas com abertura aparente maior e menor que 10 mm e ocorre principalmente no intervalo de profundidades de 90 a 110 metros e nos intervalos abaixo dele.

Os grupos 5B, 6B e 7B são menos representativos e contém as fraturas com alto ângulo de mergulho. O grupo 5B possui apenas fraturas com abertura aparente <10 mm com direção entre N75W e N60W e mergulhos entre 60 e 70° com sentido

entre N15E e N30E, ocorrendo entre 70 e 90 metros de profundidade (Apêndice A). O grupo 6B possui direção entre N75W e N45W, mergulho entre 60 e 80° e sentido entre S15W e S45W, ocorrendo nas maiores profundidades. O grupo 7B apresenta fraturas subverticais com predomínio de fraturas com abertura aparente >10 mm de direção entre N75E e W-E, mergulhos de 70 a 90° e sentido S e S15E, ocorre exclusivamente abaixo da profundidade de 130 metros (Apêndice A).

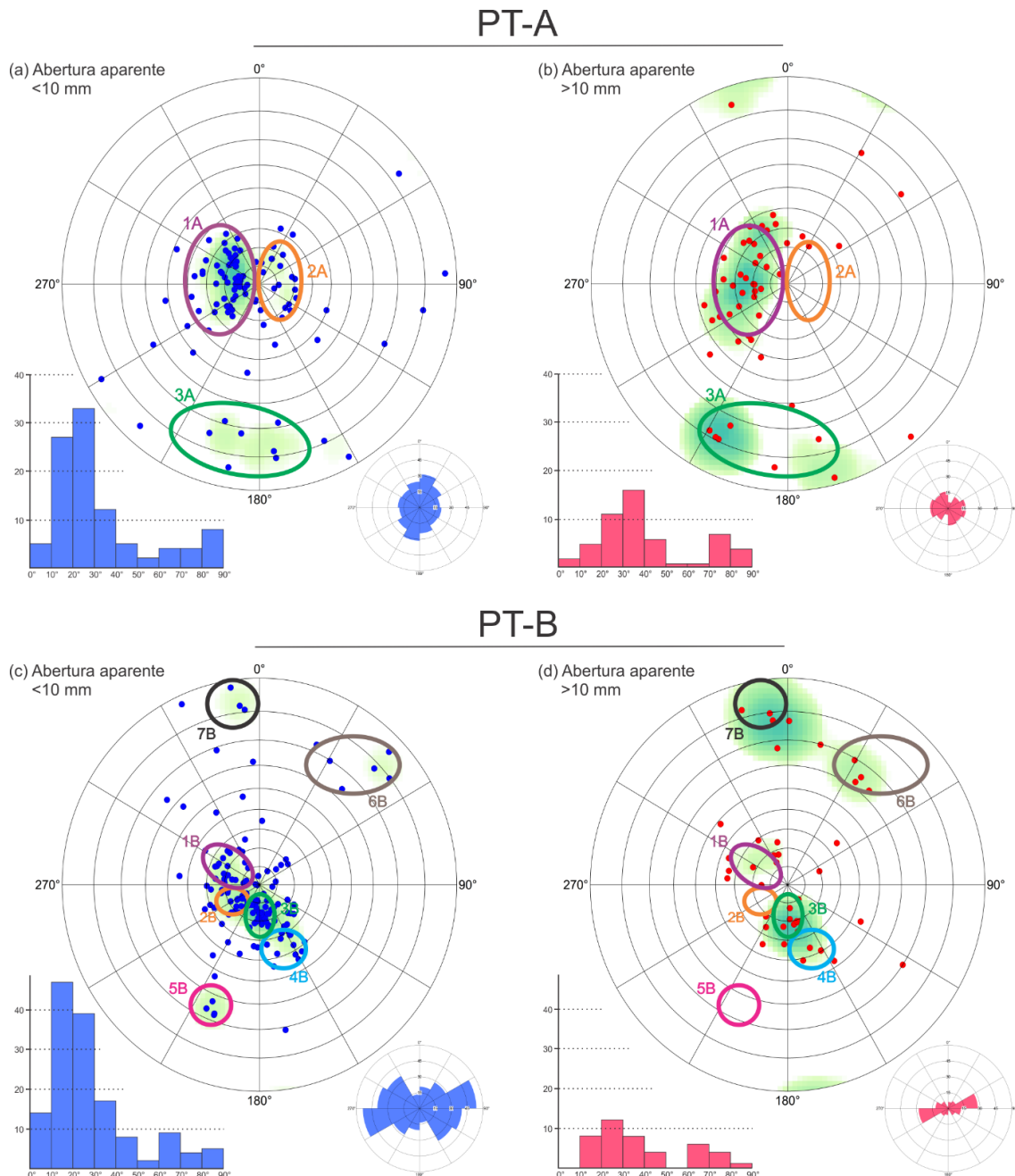
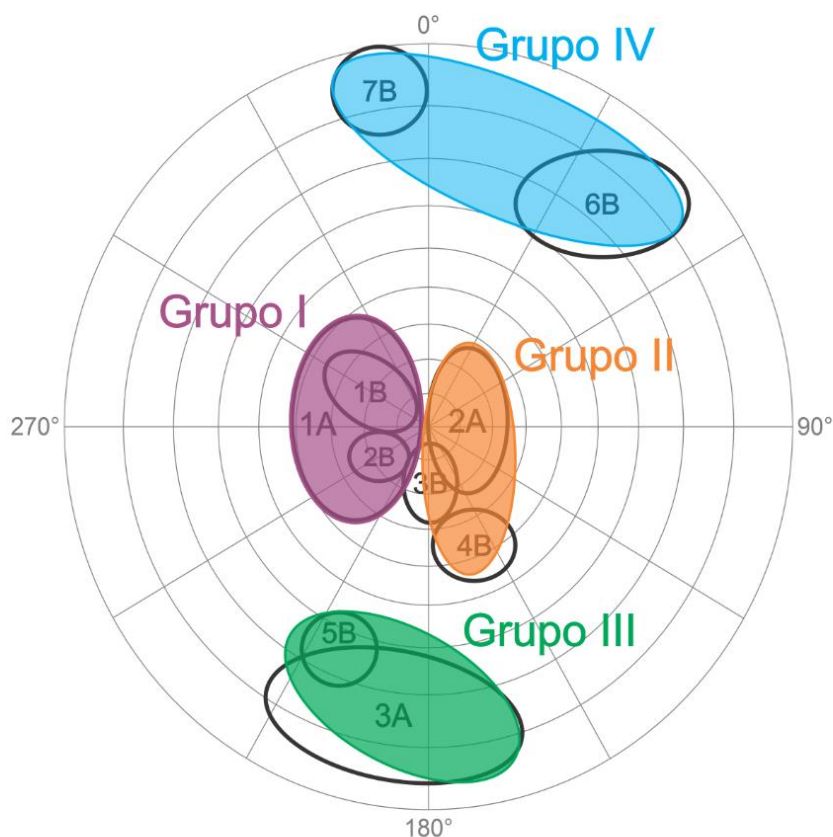


Figura 4.6: Estereogramas obtidos pela perfilagem acústica e ótica dos poços tubulares PT-A e PT-B. Em cada gráfico, são apresentados: as projeções polares das fraturas observadas com a indicação do agrupamento interpretado nos estereogramas; as direções das fraturas no diagrama de roseta no canto inferior direito; e a frequência dos ângulos de mergulho das fraturas no histograma do canto inferior esquerdo. (a) fraturas com abertura aparente <math><10\text{ mm}</math> e (b) <math>>10\text{ mm}</math> no poço tubular PT-A; (c) fraturas com abertura aparente <math><10\text{ mm}</math> e (d) <math>>10\text{ mm}</math> no poço tubular PT-B.

Analisando os grupos observados nos dois poços em conjunto, é possível definir quatro grupos principais de fraturas para o aquífero fraturado em estudo, descritos na Figura 4.7.



Grupo	Direção	Mergulho (Ângulo / Direção)
I	N60W a N60E	<40 / N30E a S30E
II	N60W a N75E	<45 / N15W a S30W
III	N60W a N75E	55 a 85 / N15W a N30E
IV	N45W a N75E	60 a 85 / S45W a S15E

Figura 4.7: Estereograma com a indicação dos grupos de fraturas identificados nos poços tubulares PT-A e PT-B e a unificação dos grupos similares para o aquífero fraturado na região de estudo. E tabela descrevendo os grupos de fratura indicados no estereograma com a direção do plano de fratura e direção e ângulo de seu mergulho.

No afloramento presente na área, dois conjuntos de fraturas são observados: o primeiro com direção N60E com mergulho de 60° para NW; o segundo com direção N30W com mergulho de 40° para SW. Estes conjuntos são mais próximos aos Grupos III e IV, com mergulhos mais verticais, que são subamostrados em estruturas verticais como os poços tubulares, mas são mais representativas em estruturas horizontais como os afloramentos.

A análise dos lineamentos da região demonstra o predomínio de estruturas com orientação NE e NW (Figura 4.8), corroborando com os principais grupos de fraturas observados nos poços tubulares (Grupo I e II).

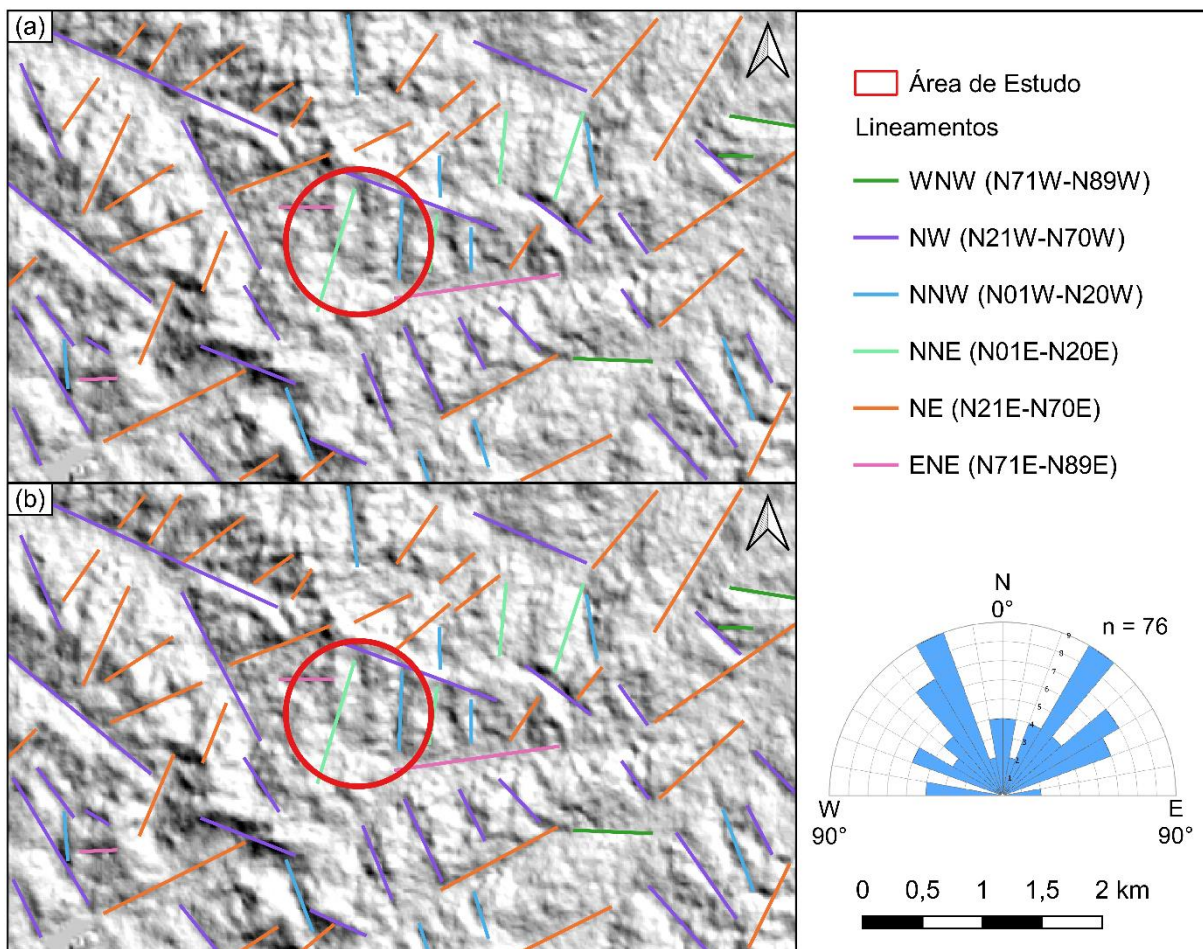


Figura 4.8: Lineamentos observados pelo estudo regional com base no Modelo Digital de Elevação (MDE) da região de estudo. (a) incidência de luz no MDE a 45°; (b) incidência de luz no MDE a 315°. A legenda indica o agrupamento realizado para os lineamentos e a distribuição no diagrama de roseta.

Em um contexto mais amplo, outros estudos realizados no Complexo Embu (Alves, 2008; Fernandes et al., 2016; Pino, 2021) (Figura 4.1) identificaram uma série de grupos de fraturas (Tabela 4.1). Comparando estes grupos aos identificadas neste estudo, as seguintes semelhanças entre os grupos são notadas:

- Grupo I e os grupos 3B (Alves, 2008), NNE a NE/baixo (Fernandes et al., 2016) e B e C (Pino, 2021), que exceto pelo grupo C possuem alta importância para o fluxo de acordo com os seus autores;
- Grupo II e o grupo 2A (Alves, 2008), que possui alta importância para o fluxo de acordo com o autor;

- Grupo III e os grupos identificados em pedreiras NW a NNW/vertical e NE/vertical (Fernandes et al., 2016); e
- Grupo IV e os grupos D e E (Pino, 2021) que possuem baixa importância para o fluxo segundo o autor.

Assim, tanto o Grupo I quanto o Grupo II possuem similaridades com os grupos indicados com alta importância para o fluxo da água subterrânea pelos autores de outros estudos dentro do contexto do Complexo Embu.

Tabela 4.1: Descrição dos grupos de fraturas identificados por Alves (2008), Fernandes et al (2016) e Pino (2021) em estudos no contexto estrutural do Complexo Embu

Grupo	Direção	Mergulho (Ângulo / Direção)	Importância para o fluxo
<b>Alves, 2008</b>			
1	sub-horizontal	<25 / -	Baixa
2A	N-S	36 / W	Alta
2B	N-S	75 / E	Alta
3A	NE-SW	66 / NW	Alta
3B	NE-SW	36 / SE	Alta
4	WNW-ESE	78 / NE	Baixa
<b>Fernandes et al., 2016</b>			
NNE to NE/baixo	NNE-SSW	10 to 40 / NNE to NE	Alta
E-W to ENE/médio	E-W	30 to 60 / E-W to WNW	Baixa
E-W to ENE/vertical*	E-W	>60 / E-W to ENE	Média
NW to NNW/vertical*	NW-SE	>60 / NW to NNW	Média
NE/vertical*	NE-SW	>60 / NE	Média
<b>Pino, 2021</b>			
A	sub-horizontal	- / -	Alta
B	NE-SW	37 / SE	Alta
C	NNE-SSW	37 to 49 / SE	Baixa
D	NW-SE	80 to 86 / NE to SW	Baixa
E	NE-SW	71 to 90 / SE	Baixa

\*: Grupos identificados em afloramentos

### **4.6.3. Avaliação do fluxo com HPF**

De acordo com as medições realizadas com o HPF em fluxo ambiente e induzido (Apêndice A), o poço tubular PT-A exibe a maior variação de fluxo (3,2 L/min) no seu intervalo basal (a partir de 178 m). Em condição ambiente, o fluxo é ascendente até 120 m, sendo que nesta profundidade existe uma entrada de água que torna o fluxo descendente até o fundo do poço (Figura 4.9). Na condição de fluxo induzido pelo bombeamento, o fluxo é ascendente, com entrada de água no poço na região basal entre 178 e 192 m (Figura 4.9). Na profundidade de 73 m, ocorre uma variação do fluxo que gera uma zona com entrada e saída de água do poço. Devido à inconsistência destes dados com os demais, esta variação foi interpretada como um vazamento entre os *diverters* da sonda HPF.

O poço tubular PT-B (Apêndice A) possui uma fratura a 26 m (acima do nível estático) que verte água para o poço, representando uma zona de entrada de água. Assim como o PT-A, o PT-B apresenta a maior variação (5,5 L/min) de fluxo na região basal, a partir de 147 m (Apêndice A). Em condição ambiente, o fluxo é descendente até a profundidade de 145 m, e entre 145 e 148 m existe uma zona de saída de água do poço (Figura 4.9). Com a condição induzida pela injeção de água, o fluxo se comporta de maneira semelhante à condição ambiente, exceto pelo fluxo nas profundidades abaixo de 148 m, que permanece descendente (Figura 4.9).

A medição do fluxo no poço tubular PT-B em condição de fluxo induzido pelo bombeamento do poço tubular PT-A indica fluxo descendente ao longo de todo o perfil do poço, mas com fluxo menor que nos testes anteriores, e uma zona de saída de água entre as profundidades de 55 e 65 metros (Figura 4.9).

Considerando os ensaios realizados com o HPF, nota-se que em ambos os poços tubulares, as principais zonas de fluxo, ou seja, as zonas que possuem fraturas hidráulicamente ativas, se concentram nas regiões basais dos poços. Contudo, as variações no fluxo são pequenas, com amplitudes menores que 3,5 L/min, indicando um ambiente praticamente estagnado ao longo do perfil dos poços.

### **4.6.4. Teste hidráulico *cross-borehole***

No ensaio do tipo *cross-borehole*, em que a água foi injetada no poço tubular PT-B e o fluxo foi medido pela sonda HPF no PT-A, foi possível observar resposta à injeção de água em todos os intervalos testados no poço tubular PT-A (Figura 4.9).

Nos três intervalos mais rasos testados (57, 73 e 173 m), a resposta do fluxo à injeção foi semelhante (Figura 4.9). Todos partem de uma condição de fluxo estagnado para fluxo ascendente após o início da injeção, atingindo um pico de fluxo de 0,3 L/min e voltando a estabilização após o fim da injeção. Este comportamento semelhante no intervalo de 57 a 173 m indica que não há mudança na dinâmica de fluxo, ou seja, que não há zonas de entrada ou saída de água significativas neste trecho.

A partir do intervalo de 179 m, e no intervalo subsequente, a resposta de fluxo à injeção possui menor amplitude, contudo, estes intervalos apresentam condições de fluxo distintas do intervalo anterior (57 a 173 m) (Figura 4.9). O teste realizado a profundidade de 179 m indica fluxo descendente em condição ambiente e ascendente após o início da injeção de água no poço tubular PT-B, ao cessar a injeção o fluxo retorna à condição ambiente. Na profundidade de 193 m o fluxo é descendente ao longo de todo o ensaio e se observa a menor amplitude de variação do fluxo (0,1 L/min).

A análise em conjunto dos poços tubulares pelo ensaio hidráulico do tipo *cross-borehole* indica que a comunicação entre eles ocorre pelas fraturas situadas no fundo do poço, nas zonas hidráulicamente mais ativas observadas pela perfilagem de fluxo com o HPF, uma vez que a variação da resposta ao pulso entre os intervalos de 173 e 179 m. Destaca-se a rapidez de detecção do pulso de injeção entre os poços, indicativo de que a água faz um caminho curto na rede de fraturas que conecta ambos

#### **4.6.5. Teste hidráulico com obturadores**

Em cada trecho ensaiado, após os obturados serem posicionados e inflados e antes do início do teste de perda d'água sob pressão, as relações de carga hidráulica entre os intervalos isolados foram medidas e são apresentadas na Tabela 4.2. A comparação entre as cargas hidráulicas medidas em cada intervalo demonstra um fluxo descendente no poço em condição ambiente, com cargas hidráulicas mais elevadas na parte superior e menores na parte inferior. Estes dados corroboram com os obtidos pela perfilagem de fluxo e os testes de *cross-borehole* realizados com o HPF, que indicam as mesmas condições de fluxo em condição ambiente, com entrada de água na fratura mais rasa (26 m) e saída nos intervalos inferiores.

O ensaio de perda d'água sob pressão realizado no poço tubular PT-B corrobora com os dados obtidos pelo HPF, uma vez que os intervalos mais

transmissivos são o de entrada de água no poço acima do nível estático (25,5 a 26,5 m) e os dois intervalos basais testados (147 a 180 m) (Figura 4.9). No poço tubular PT-A com a utilização do *software* FLASH-R, foi possível definir que os intervalos mais profundos (178 a 193 m) também são os que mais contribuem para a transmissividade do poço, com cerca de 68%.

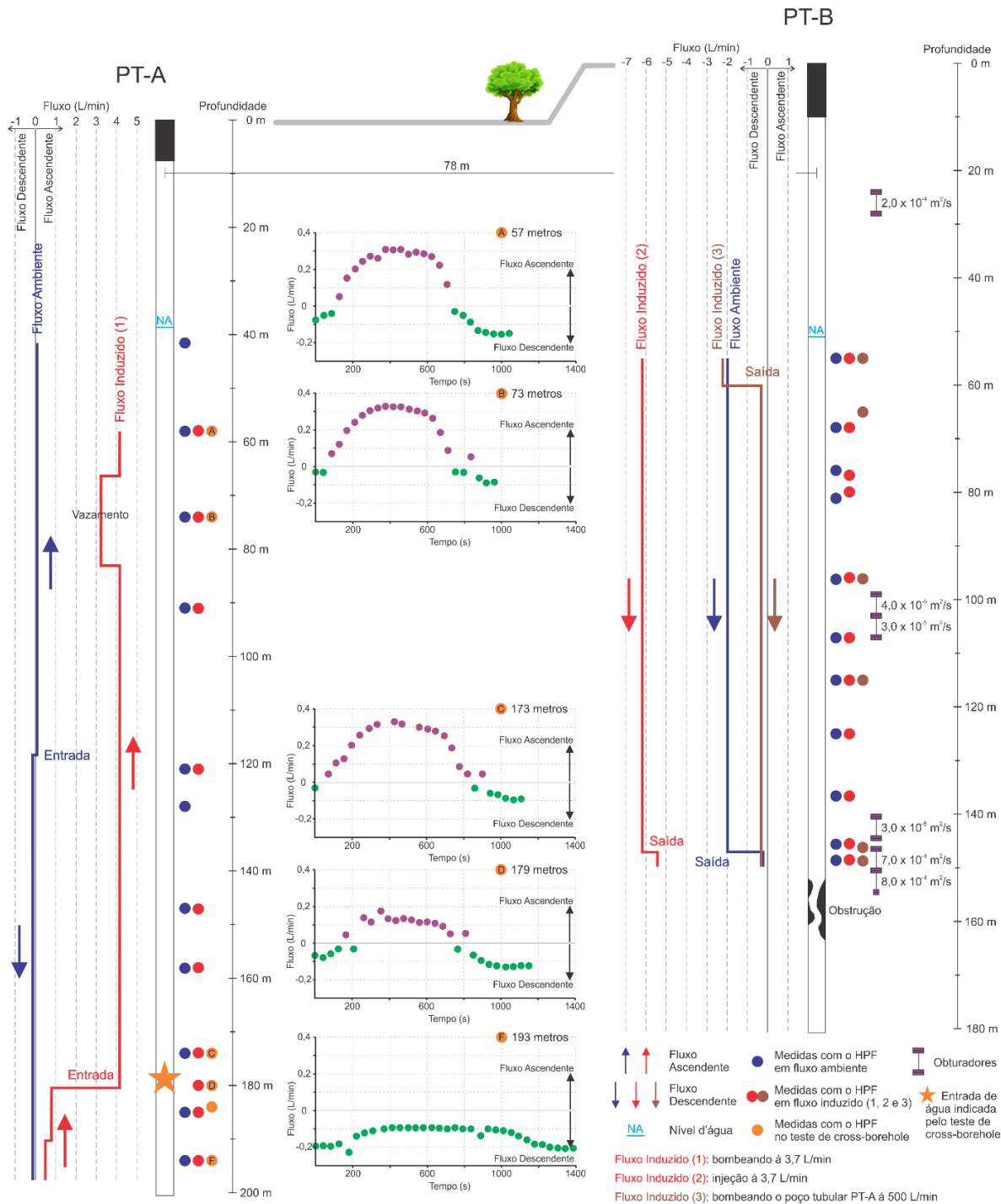


Figura 4.9: Resultados dos ensaios realizados com o HPF nos poços tubulares PT-A e PT-B. Para cada poço tubular, as profundidades de realização dos testes em cada condição de fluxo e a interpretação dos resultados obtidos são indicadas (direções de fluxo dentro dos poços tubulares e as zonas de entrada ou saída de água). Ao centro são apresentados os gráficos obtidos durante o teste hidráulico do tipo *cross-borehole*, com a indicação das mudanças de fluxo geradas pelo teste.



Tabela 4.2: Relação das cargas hidráulicas de intervalos isolados medidos com o auxílio dos obturadores. A superior indica a carga hidráulica acima do obturador superior; a intermediária a carga hidráulica entre os obturadores, ou seja, do intervalo ensaiado; e a inferior a carga hidráulica abaixo do obturador inferior.

Intervalo Ensaiado (m)	Carga Hidráulica (m)		
	Superior	Intermediária	Inferior
25,5 - 26,5	788,07	788,07	- <sup>1</sup>
100,5 - 101,5	761,87 <sup>2</sup>	761,87	760,57
104,5 - 105,5	773,56	761,80	761,64
141,0 - 142,0	771,12	761,04	760,25
147,0 - 180,0	777,08	760,37 <sup>3</sup>	
149,0 - 180,0	760,28	759,78 <sup>3</sup>	

<sup>1</sup>: intervalo seco pois trata-se da fratura que verte água para o poço acima do seu nível estático; <sup>2</sup>: carga não estabilizada; <sup>3</sup>: intervalo medido apenas com o obturador superior inflado, devido a presença de obstrução no poço tubular.

#### 4.6.6. Teste de bombeamento

Em escala mais ampla, o teste de bombeamento demonstrou uma pequena perturbação no aquífero do manto de intemperismo (poços de monitoramento PM-06, PM-15 e PM-26, Figura 4.4) e no poço tubular PT-A instalado no aquífero fraturado (Figura 4.10). As cargas hidráulicas dos poços de monitoramento no aquífero do manto de intemperismo variam em torno de 0,05 a 0,10 m entre o início e o fim do teste, indicando que o bombeamento do poço tubular PT-B a vazão de 12 m<sup>3</sup>/h, gera conexão entre os aquíferos.

O padrão senoidal vista nos gráficos está associada a influência da variação da pressão atmosférica nos poços ao longo do teste, uma vez que, devido a falta de um medidor de controle para a pressão atmosféricas, os dados não foram normalizados. Contudo, apesar deste padrão, ainda se observa nos gráficos uma tendência de queda da carga hidráulica durante o teste.

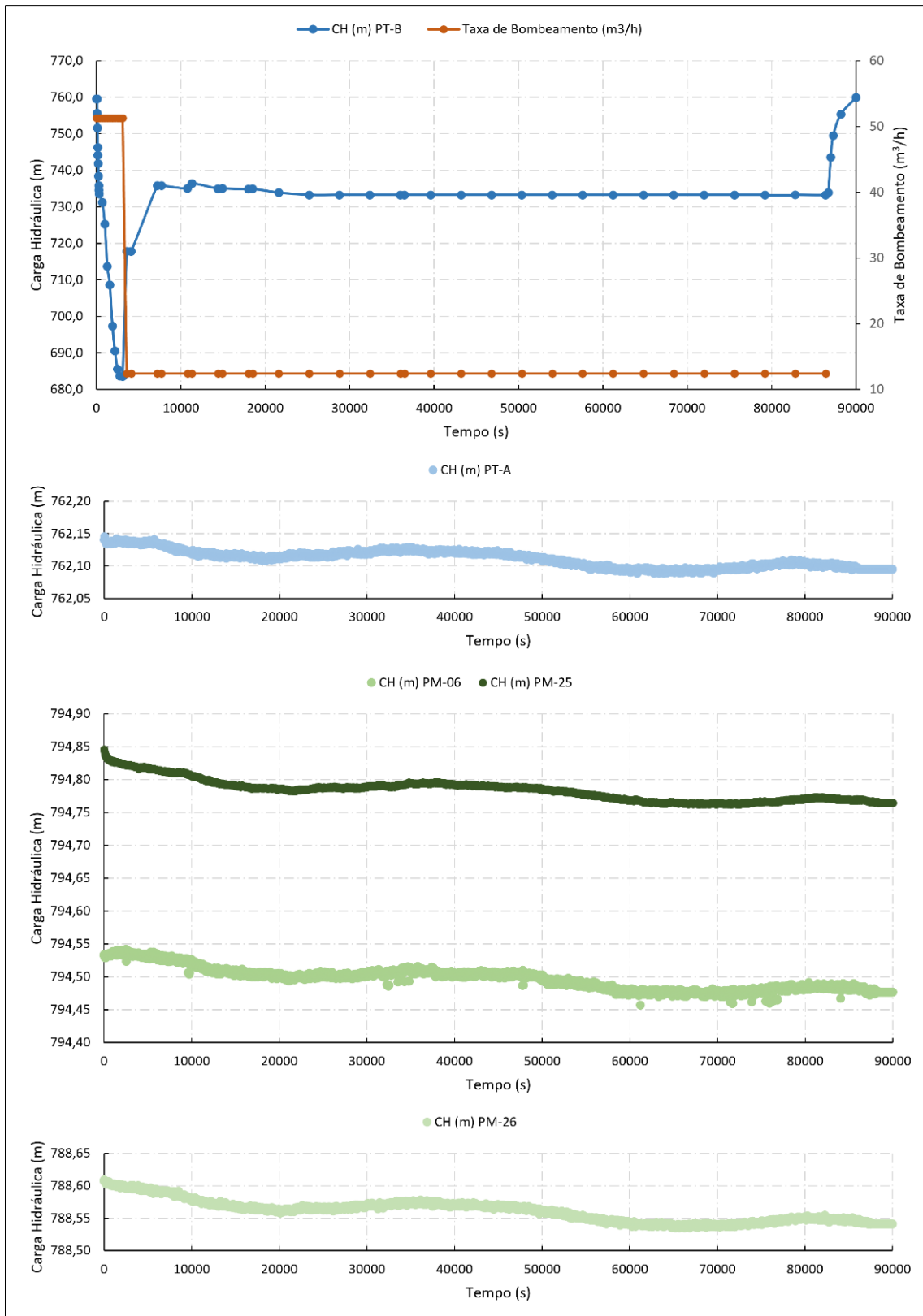


Figura 4.10: Gráficos de resposta ao teste de bombeamento do poço bombeado (PT-B) e dos poços observados (PT-A, PM-06, PM-25 e PM-26) ao longo do tempo. De cima para baixo: variação da carga hidráulica (CH) e da taxa de bombeamento do poço tubular PT-B; variação da carga hidráulica (CH) do poço tubular PT-A; variação da carga hidráulica (CH) do poço de monitoramento raso PM-06, PM-25 e PM-26.

#### **4.6.7. Análises químicas**

A amostragem discreta com os obturadores no poço tubular PT-B foi realizada em seis intervalos (Apêndice A). Destes intervalos, somente dois apresentaram concentrações acima do limite de quantificação do método analítico, no intervalo de 25,5 a 26,5 m e de 147 a 180 m.

O primeiro intervalo (25,5 a 26,5 metros) representa a fratura que verte água para o poço tubular acima do seu nível d'água. A fratura possui direção aproximada N45W e mergulho de 10° para NE, classificada como Grupo I. Neste intervalo foram detectadas concentrações dos compostos clorados PCE (3,0 µg/L), TCE (3,0 µg/L) e Clorofórmio (8,0 µg/L).

O segundo intervalo (147 a 180 metros) representa o fundo do poço tubular, uma vez que, devido às irregularidades da parede do furo, foi possível inflar apenas o *packer* superior, isolando todo o intervalo inferior (>147 metros). Neste trecho foram detectadas concentrações de PCE (4,0 µg/L) e Clorofórmio (5,0 µg/L).

De acordo com o histórico ambiental da área de estudo, os compostos PCE, TCE cis-1,2-DCE, Cloreto de Vinila e Clorofórmio são detectados no aquífero do manto de intemperismo na área de estudo e no seu entorno. Desta forma, a detecção de compostos eteno clorados no aquífero do manto de intemperismo é mais um indício da conexão hidráulica entre os aquíferos e entre as fraturas mais rasas e profundas do aquífero

#### **4.7. Modelo Conceitual Hidrogeológico**

O modelo conceitual hidrogeológico da área (Figura 4.11) foi construído com base na análise conjunta dos dados hidráulicos, estruturais e químicos dos poços tubulares avaliados. E as ferramentas utilizadas foram adequadas, forneceram dados suficientes para a construção das interpretações finais, assim como a escala de trabalho e os poços tubulares utilizados.

Observa-se que as fraturas do Grupo I e do Grupo II são as mais representativas em quantidade e importância para o fluxo e representam as zonas de maior transmissividade do poço tubular PT-B.

Nas quatro condições de fluxo estudadas, existe uma entrada de água no poço tubular PT-B a 26 m, vertendo no poço sobre o nível estático. Esta fratura, do Grupo I, possui alta transmissividade e possivelmente conecta o aquífero do manto de

intemperismo com o aquífero fraturado, sendo a responsável por carrear a contaminação para o poço tubular PT-B.

Em condição ambiente (Figura 4.11 (a)) e de fluxo induzido (1/2) (Figura 4.11 (b)), ou seja, com o bombeamento à 3,7 L/min do poço tubular PT-A (1) e injeção de água à 3,7 L/min no poço tubular PT-B (2), o fluxo ocorre pelas fraturas basais dos poços (>170 m no PT-A e >140 m no PT-B). Estas fraturas pertencem ao Grupo II, representam uma zona de alta transmissividade e nelas são detectados os contaminantes.

Na condição induzida de bombeamento do poço tubular PT-A a 500 L/min (Figura 4.11 (c)), se observa uma saída de água logo abaixo do nível estático do poço tubular PT-B, que possivelmente conecta os dois poços tubulares. Mesmo nestas condições, o poço tubular PT-B mantém seu fluxo descendente influenciado pelas fraturas basais mais transmissivas, que são uma zona de saída de água.

As condições de carga hidráulica e fluxo impostas pela rede de fraturas levam a migração da contaminação presente no manto de intemperismo para os poços tubulares pelas fraturas rasas (Grupo I), que conectam os dois aquíferos. Em razão do fluxo descendente do poço tubular PT-B e da saída de água nas fraturas profundas mais transmissivas (Grupo II), a contaminação migra pela coluna de água do poço e é transportada para o aquífero fraturado. E apesar da menor representativa vista das fraturas de alto ângulo de mergulho, pela subamostragem do método, elas cortam as fraturas dos Grupos I e II e provavelmente as ligam verticalmente. A migração dos contaminantes independe das condições de bombeamento dos poços, uma vez que a entrada do contaminante ocorre por uma fratura acima do nível estático do poço tubular PT-B e, em todas as condições avaliadas, as fraturas abaixo dos 140 m de profundidade representam uma zona de saída de água.

#### **4.7.1. Incertezas**

A avaliação estrutural das rochas que compõem o aquífero fraturado foi realizada por meio de estruturas verticais (poços tubulares) o que gera subamostragem de fraturas verticais, uma vez que quanto maior o seu ângulo de mergulho, menor a sua probabilidade de interceptar uma estrutura de mesma orientação. E devido a falta de afloramentos (estruturas horizontais) representativos na área de estudo e na região por conta da alta urbanização, não foi possível melhor caracterização dos grupos de fraturas de alto ângulo de mergulho.

A construção do modelo se baseou em avaliações realizadas em furo aberto, desta forma os dados obtidos representam as condições dos poços em equilíbrio com o aquífero, ou seja, representam as condições médias do aquífero e não necessariamente dos intervalos testados em casa poço. Além disso, os estudos foram realizados sem o controle dos demais poços tubulares da região, devido ao seu desconhecimento, por conta disto os dados obtidos podem ser influenciados pelo bombeamento deles e ao cone de rebaixamento regional que a extração dos poços produz.

Por fim, saliente-se que devido a disponibilidades dos equipamentos utilizados, não foi possível a coleta discreta de água subterrânea no poço tubular PT-A, assim como a realização dos testes hidráulicos com obturadores, levando a suposições da migração dos contaminantes entre os poços que não puderam ser devidamente comprovadas.

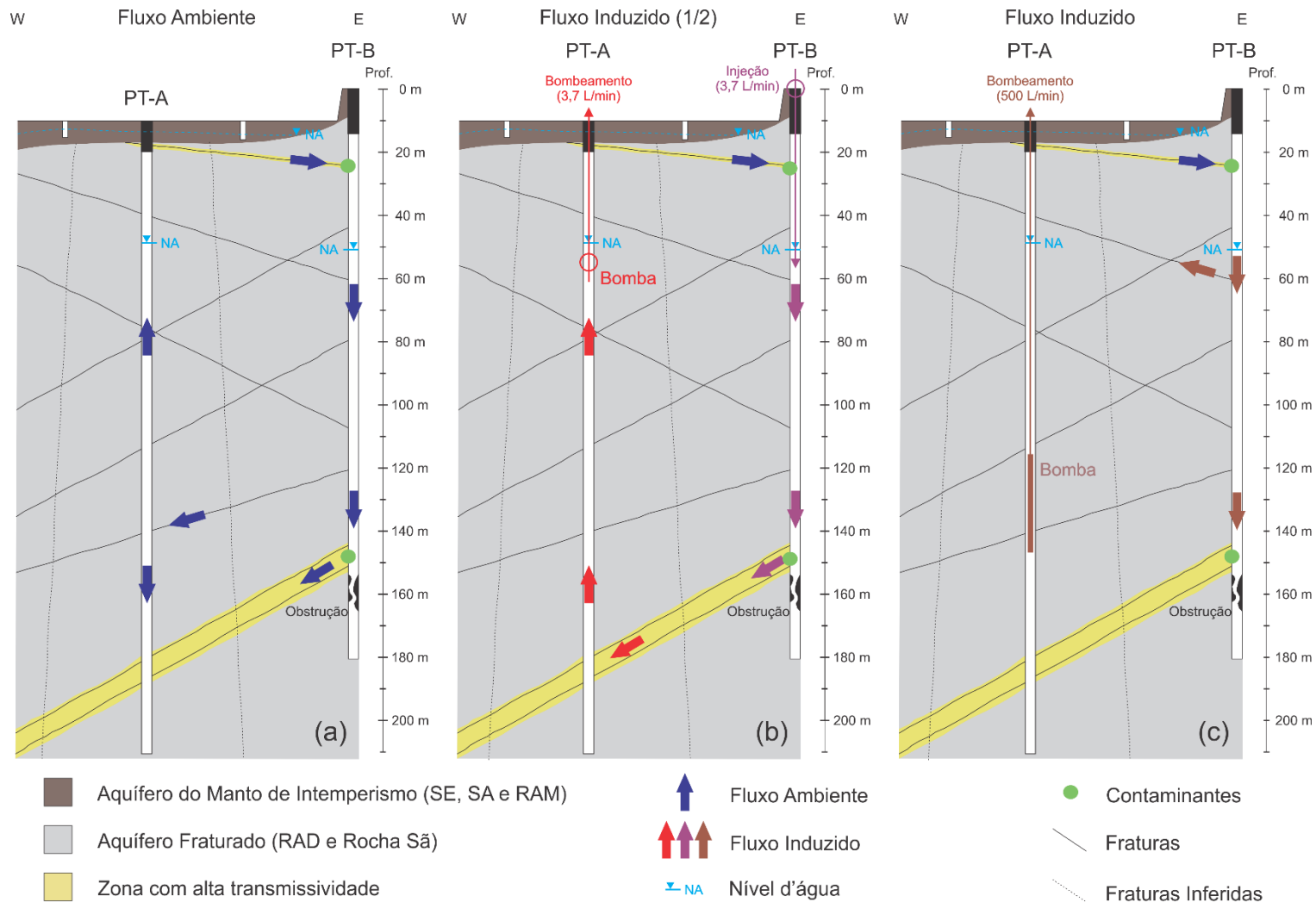


Figura 4.11: Modelo conceitual hidrogeológico da área nas quatro condições de fluxo avaliadas com a indicação do fluxo da água subterrânea pelos poços tubulares PT-A e PT-B e pelas fraturas avaliadas, devido a subamostragem das fraturas verticais existe a incerteza do espaçamento entre elas, por conta disto, são indicadas como fraturas inferidas. Da esquerda para a direita: (a) fluxo observado em condição ambiente; (b) fluxo observado em condição induzida pelo bombeamento do poço tubular PT-A (1) e, em momentos distintos, pela injeção do poço tubular PT-B (2); e (c) fluxo observado em condição induzida pelo bombeamento do poço tubular PT-A a vazão de 500 L/min.

#### **4.8. Conclusões**

O estudo do aquífero fraturado e de sua conexão com o aquífero do manto de intemperismo (aquífero intergranular) é essencial para o entendimento das condições de fluxo e de transporte dos contaminantes, sobretudo em áreas com geologia similar à da área de estudo, ou seja, com o embasamento próximo à superfície. A obtenção destas informações auxilia na construção de um modelo conceitual hidrogeológico mais representativo e embasam as ações a serem tomadas para o gerenciamento da área.

Neste cenário, estudos específicos como a perfilagem, a análise estrutural e a avaliação de fluxo dos poços tubulares são necessários, pois fornecem dados valiosos na construção do modelo conceitual. Como visto neste estudo de caso, sem eles a conexão entre os poços tubulares e entre o aquífero fraturado e o aquífero do manto de intemperismo não seria detalhada, uma vez que o teste de bombeamento realizado no poço tubular PT-B, apesar de mostrar indícios de conexão, não a detalha.

A análise do fluxo junto à análise estrutural dos poços tubulares demonstra que independente das condições de fluxo estudadas, existe a conexão entre o aquífero do manto de intemperismo e o aquífero fraturado. Esta conexão ocorre por meio das fraturas próximas à superfície, e é evidenciada pela fratura do Grupo I detectada à profundidade de 26 metros no poço tubular PT-B. Esta fratura possui alta transmissividade e verte água acima do nível estático do poço tubular, assim não sofre influência direta das condições de fluxo impostas durante as avaliações. Por esta conexão ocorre o transporte dos contaminantes organoclorados do aquífero do manto de intemperismo para o aquífero fraturado. Também devem ser consideradas as fraturas verticais, que apesar de subamostradas pelo método, possuem o potencial de conectar os dois aquíferos e os grupos de fraturas I e II, facilitando a migração vertical no aquífero.

As fraturas do Grupo II presentes na região basal de ambos os poços tubulares, entre 140 e 180 m de profundidade, representam outra zona de alta transmissividade e são responsáveis pela conexão entre os dois poços tubulares estudados. Estas fraturas em todas as condições de fluxo estudadas geram um fluxo descendente no poço tubular PT-B e representam sua zona de saída de água e uma zona de entrada para o poço tubular PT-A. O fluxo gerado por esta zona de fraturas transporta os contaminantes ao longo da coluna de água do poço tubular PT-B e os dispersam pelo aquífero fraturado.

As fraturas classificadas como Grupo I e Grupo II pelo estudo representam zonas transmissivas no aquífero fraturado e assim apresentam alta importância para o fluxo no sistema. Já as fraturas de maior ângulo de mergulho (Grupo III e IV) apresentam exercem o papel de comunicação vertical entre as fraturas dos Grupos I e II. Extrapolando estes dados para o contexto estrutural do Complexo Embu com base em estudos regionais (Alves, 2008; Fernandes et al., 2016; Pino, 2021), conclui-se que os grupos classificados pelos autores como de alta importância para o fluxo em seus estudos são similares aos Grupos I e II. Desta forma, apesar das dimensões do Complexo Embu e das prováveis distorções que estas fraturas sofrem ao longo de seu comprimento, as fraturas de direção N-S a NE-SW com mergulhos inferiores a 40° possuem a maior importância para o fluxo dentro deste contexto.

Portanto, apenas através da investigação integrada do aquífero fraturado e do aquífero do manto de intemperismo foi possível construir um modelo conceitual hidrogeológico que representa as condições hidráulicas da área de maneira mais representativa. Isto demonstra a importância da investigação do aquífero fraturado, sobretudo em áreas que apresentam um aquífero de porosidade intergranular delgado, que facilita a entrada de contaminação no aquífero fraturado.

Ademais, as investigações e o conhecimento do aquífero fraturada nas regiões que o utilizam é essencial para a proteção deste bem sobretudo em regiões altamente urbanizadas. E com a construção de modelos conceituais representativos, o gerenciamento do recurso pode ser feita de maneira mais clara e integrada por todos os responsáveis pela sua utilização em uma região.

#### **4.9. Agradecimentos**

Os autores agradecem ao CEPAS-USP e seus colaboradores pelo suporte durante as atividades de campo e interpretação dos dados obtidos. Também à Regea Geologia, Engenharia e Estudos Ambientais Ltda. e à indústria responsável legal pelo gerenciamento ambiental da área de estudo, pela gentileza de terem autorizado a utilização e a publicação dos dados obtidos.



## 5. CONCLUSÕES

A interpretação conjunta dos dados adquiridos ao longo do estudo demonstram, independentemente de qualquer das condições de fluxo estudadas, a conexão entre o aquífero do manto de intemperismo e o aquífero fraturado. Conexão dada por meio de fraturas com alta transmissividade próximas à superfície, sendo evidenciada pela fratura do Grupo I detectada à profundidade de 26 metros no poço tubular PT-B. Enquanto as fraturas de alto ângulo (Grupos III e IV), apesar de subamostradas pelo método de investigação, devem representar um importante caminho de migração entre os aquíferos e as fraturas dos Grupos I e II, uma vez que as cortam verticalmente.

Contudo, sem instrumentos adequados de perfilagem dos poços tubulares, esta conexão não seria detalhada, uma vez que o teste de bombeamento realizado no poço tubular PT-B apresenta a conexão mais em uma escala de menor detalhe. Da mesma forma, sem estas ferramentas e o ensaio do tipo *cross-borehole* entre os poços tubulares, não seria possível caracterizar a conexão entre os poços tubulares PT-A e PT-B, que se concretiza pelas fraturas do Grupo II presentes na região basal dos poços, entre 140 e 180 m de profundidade, de alta transmissividade e de suma importância para o fluxo no aquífero.

As análises estruturais ainda possibilitam a discussão sobre os grupos de fratura com alta importância para o fluxo da água subterrânea no contexto do Complexo Embu na RMSP. Apesar das dimensões do Complexo Embu e das prováveis distorções estruturais entre as regiões estudadas, as fraturas do Grupo I e II, consideradas de alta importância para o fluxo na área se assemelham com as classificadas assim por outros autores no mesmo contexto geológico e estrutural (Alves, 2008; Fernandes et al., 2016; Pino, 2021). Assim, esta semelhança, pode indicar que as fraturas de direção N-S a NE-SW com mergulhos inferiores a 40° possuem a maior importância para o fluxo dentro deste contexto.

Os ensaios com obturadores demonstram outra linha de evidência da conexão entre o aquífero do manto de intemperismo e o aquífero fraturado, uma vez que corroboram com os dados hidráulicos obtidos na etapa de perfilagem e por meio da amostragem discreta indicam a migração da contaminação pelo aquífero fraturado.

Mediante o oposto, nota-se a importância da investigação do aquífero fraturado e da aplicação de ferramentas adequadas no estudo. Para além da caracterização do

meio, a aplicação possibilita o entendimento da dinâmica de fluxo e consequentemente da migração dos contaminantes entre aquíferos, possibilitando a construção de modelos hidrogeológicos mais representativos para a tomada de decisão no GAC.

É fundamental a importância da investigação do aquífero fraturado para o gerenciamento e proteção do recurso em áreas altamente urbanizadas, uma vez que nestas regiões a água subterrânea é utilizada para o abastecimento humano. Assim, o constante desenvolvimento do tema e de ferramentas de fácil aplicabilidade tem se tornado cada dia mais essencial.

Desta forma, o desenvolvimento de trabalhos como este, da investigação do aquífero fraturado e de sua conexão com os aquíferos freáticos rasos no contexto de áreas contaminadas na RMSP, devem ser realizados e incentivados. Posto que são fundamentais para o entendimento do fluxo da água subterrânea no contexto estrutural do Complexo Embu, para a identificação de contaminantes que afetam a qualidade da água subterrânea de consumo humano e para o desenvolvimento do tema de investigação do aquífero fraturado no gerenciamento de áreas contaminadas. Demonstrando como o gerenciamento da água subterrânea só poderá ser realizado com êxito quando a construção de modelos conceituais hidrogeológicos mais representativos e a sua integração regional for a regra para a utilização do recurso.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022, NBR 16210: Modelo conceitual no gerenciamento de áreas contaminadas – Procedimento, 5 p.

Alves, F.M., 2008, Tectônica rúptil aplicada ao estudo de aquífero em rochas cristalinas fraturadas na região de Cotia, SP [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, <https://doi.org/10.11606/D.44.2008.tde-02092008-150509>.

Anderson, M.R., Johnson, R.L., Pankow, J.F., 1992, Dissolution of dense chlorinated solvents into groundwater: dissolution from a well-defined residual source: *Groundwater*, v. 30, p. 250-256, <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1992.tb01797.x>.

Barbosa, M.B., 2020. Aplicação e desenvolvimento dos métodos de caracterização de aquíferos fraturados utilizando poços tubulares [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, <https://doi.org/10.11606/T.44.2020.tde-03082020-132524>.

Barbosa, M.B., Bertolo, R., Hirata, R.C.A., 2017, A method for environmental data management applied to megasites in the State of São Paulo, Brazil: *Journal of Water Resources and Protection*, v. 9, no. 3, <https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.93021>.

Barbosa, M.B., Terry, N., Day-Lewis, F.D., Bertolo, R., Lane Jr, J.W., 2020, FLASH-R (Flow-Log Analysis of Single Holes) v1.0: an R app for the analysis of borehole vertical flow logs to estimate fracture (or layer) transmissivities and far-field hydraulic heads: U.S. Geological Survey software versão, Janeiro 20, 2020, <https://doi.org/10.5066/P9U9V9YU>.

Bear, J., 1979, *Hydraulics of Groundwater*: London, McGraw-Hill International Book Co., 567 p.

Bertolo, R., 2017, Bases técnicas para a gestão de áreas contaminadas por solventes organoclorados em aquíferos fraturados [Tese de Livre Docência]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, <https://doi.org/10.11606/T.44.2018.tde-16032018-095039>.

Bertolo, R., Hirata, R., Conicelli, B., Simonato, M., Pinhatti, A., Fernandes, A., 2015, Água subterrânea para abastecimento público na Região Metropolitana de São Paulo: é possível utilizá-la em larga escala?: *Revista DAE*, no. 199, p. 6-17. 2015, <https://doi.org/10.4322/dae.2014.148>.

Burger, K., Carpenter, P., Chan, K., Finch, M., Muniz-Ghazi H., Oudiz, D., Shaddy., K., Sotelo, J., 2008, Proven technologies and remedies guidance remediation of metals in soil: Department of Toxic Substances Control California Environmental Protection Agency Open-File Report 2008, 83 p., [https://dtsc.ca.gov/wp-content/uploads/sites/31/2018/11/PT-R\\_Metals\\_Main\\_Text\\_0808-2.pdf](https://dtsc.ca.gov/wp-content/uploads/sites/31/2018/11/PT-R_Metals_Main_Text_0808-2.pdf).

Busse, J., Paillet, F.L., Hossack, A., Bringemeier, D., Scheuermann, A., Li, L., 2016, Field performance of the heat pulse flow meter: Experiences and recommendations: Journal of Applied Geophysics, v. 126, p. 158-171. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.01.021>.

Cavalcante, J.C., Kaefer, L.Q., 1974, Complexo Piracaia estudos preliminares: 28º Congresso Brasileiro de Geologia, SBG, v. 5, p. 101-106.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2017, Decisão de Diretoria nº 038/2017/C, de 07 de fevereiro de 2017, 65 p.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2021, Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/documentacao/manual-de-gerenciamento-de-areas-contaminadas/> (acessado Março 2023).

Collier, H.A., 1993, Borehole Geophysical Techniques for Determining the Water Quality and Reservoir Parameters of Fresh and Saline Water Aquifers in Texas: Texas Water Development Board Open-File Report 1993, v.1, 374 p., [http://www.twdb.texas.gov/publications/reports/numbered\\_reports/doc/r343/r343vol1\\_1.pdf](http://www.twdb.texas.gov/publications/reports/numbered_reports/doc/r343/r343vol1_1.pdf).

Coutinho, J.M.V., 1972, Petrologia do Pré-Cambriano de São Paulo e arredores: Boletim IG, v. 3, p. 5-99, <https://doi.org/10.11606/issn.2316-8978.v3i0p05-99>.

Day-Lewis, F.D., Johnson, C.D., Paillet, F.L., Halford, K.J., 2011, FLASH: a computer program for flow-log analysis of single holes: Groundwater, v. 49, p. 926-931, <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2011.00798.x>.

Domenico, P., Schwartz, F., 1990, Physical and Chemical Hydrogeology: New York, John Wiley & Sons, 824 p.

Fanti, A.C., 2015, Investigação de aquífero fraturado para entendimento de fluxo e transporte de contaminantes clorado: estudo de caso em Valinhos, SP [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 159 p., <https://doi.org/10.11606/D.44.2016.tde-17062016-145701>.

Fanti, A., Bertolo, R., Vogado, F., Cagnon, F., Queiroz, A.P., 2017, Application of geophysical logging and straddle packers for the investigation of a fractured aquifer in a contaminated area by chlorinated solvents in São Paulo State, Brazil: Journal of Water Resource and Protection, v. 9, p. 1145-1168, <https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.910075>.

Fernandes, A.J., 1997, Tectônica Cenozóica na porção média da bacia do Rio Piracicaba e sua aplicação à hidrogeologia [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 269 p., <https://doi.org/10.11606/T.44.1997.tde-30092013-163243>.

Fernandes, A.J., 2008, Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação: Revista do Instituto Geológico, São Paulo, v. 29, p. 49-72, <https://doi.org/10.5935/0100-929X.20080005>.

Fernandes, A.J., Rudolph, D.L., 2001, The influence of Cenozoic tectonics on the groundwater-production capacity of fractures zones: a case study in São Paulo, Brazil: Hydrogeology Journal, v. 9, p. 151-167.

Fernandes, A.J., Fiume, B., Bertolo, R., Hirata, R.C.A., 2016, Modelo geométrico de fraturas e análise da tectônica rúptil aplicados ao estudo do fluxo do aquífero cristalino, São Paulo (SP): Revista do Instituto de Geociências - USP, v 16, p. 71-88, <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v16i3p71-88>.

Fetter, C.W., 2001, Applied Hydrogeology: New Jersey, Prentice Hall, 598 p.

Fetter, C.W., 2008, Contaminant Hydrogeology: Long Grove, Illinois: Waveland Press Inc., 500 p.

Fiume, B., Fernandes, A.J., Barbosa, M.B., Hirata, R.C.A., Bertolo, R., 2020, Integrated application of geophysical loggings and fracture survey on rock exposures for identifying transmissive fractures in crystalline aquifer: case study in the city of São Paulo: Brazilian Journal of Geology, v. 50, no. 1, <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020190034>.

Francesse, R., Mazzarini, F., Bistacchi, A., Morelli, G., Pasquare, G., Praticelli, N., Robain, H., Wardel, N., Zaja, A., 2009, A structural and geophysical approach to the study of fractured aquifers in the Scansano-Magliano in Toscana Ridge, Southern Tuscany, Italy: Hydrogeology Journal, v. 17, p. 1233-1246, <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0435-1>.

Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979, Groundwater: New Jersey, Prentice Hall, 604 p.

Hart, S.T., Bertolo, R., Agostini, M.S., Feig, R., Lojkasek-Lima, P., Gouvea Jr, J.C.R., Barreto, F.S., Aravena, R., 2022, Hydrogeochemical and isotopic evaluation of VOC commingled plumes in a weathered fractured bedrock aquifer treated with thermal and bioremediation: *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 245. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103940>.

Hasui, Y., Sadowski, G.R., Carneiro, C.D.R., 1976, Considerações sobre a estratigrafia do Pré-Cambriano na região de São Paulo: *Boletim IG*, v. 7, p. 107-112, <https://doi.org/10.11606/issn.2316-8978.v7i0p107-112>.

Hennies, W.T., Hasui, Y., Penalva, F., 1967, O falhamento transcorrente da Taxaquara: 21º Congresso Brasileiro de Geologia, SBG, p. 159-168.

Hess, A.E., 1986, Identifying hydraulically conductive fractures with a slow-velocity borehole flowmeter: *Canadian Geotechnical Journal*, v. 23, no. 1, p. 69-78.

Hess, A.E., Paillet, F.L., 1990. Applications of the thermal pulse flowmeter in the characterization of fractured rocks, in Paillet, F.L., Saunders W.R., eds., *Geophysical Applications for Geotechnical Investigations*: Philadelphia, Special Publication, p. 99-112.

Hirata, R., Bertolo, R., Conicelli, B., Maldaner, C., 2012, Hidrogeologia da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê, in: Negro, A., Namba M., Sanches, V., Dyminski A., Kormann, A., eds., *Twin Cities: Solos das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Curitiba*: São Paulo, D'Livros, v. 1, p. 67-82.

Hoek, E., Bray J.W., 2005, *Rock Slope Engineering* (4ª ed.): Institute of Mining and Metallurgy, London, 402 p.

Holloway, O.G., Waddell, J.P., 2008, Design and operation of a borehole straddle packer for ground-water sampling and hydraulic testing of discrete intervals at U.S. Air Force Plan 6, Marietta, Georgia: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1349, 32 p, <https://pubs.usgs.gov/of/2008/1349/pdf/ofr2008-1349.pdf>.

Hsu, S., Ke, C.C., Lin, Y.T., Huang, C.C., Wang, Y.S., 2019, Unravelling preferential flow paths and estimating groundwater potential in a fractured metamorphic aquifer in Taiwan by using borehole logs and hybrid DFN/EPM model: *Environmental Earth Sciences*, v. 78. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8150-2>.

Hubbard, B., Roberson, S., Samyn, D., Merton-Lyn, D., 2008, Digital optical televiewing of ice boreholes: *Journal of Glaciology*, v. 54, p. 823-830, <https://doi.org/10.3189/002214308787779988>.

Juliani, C., 1992, O embasamento pré-cambriano da Bacia de São Paulo: ABAS/ABGE/SBG-SP: Seminário Problemas Geológicos e Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo, p. 3-20, <https://repositorio.usp.br/directbitstream/86c2eb34-9bed-44f5-98c2-09d33672e65f/1613768.pdf>.

Keys, W.S., 1990, Borehole geophysics applied to ground-water investigation, in Interior, U.S.D., ed., Borehole geophysics applied to ground-water investigations: U.S. Geological Survey, Denver, 150 p, <https://doi.org/10.3133/twri02E2>.

Kueper, B., Wearhall, G., Smith, J., Leharne, S., Lerner, D., 2003, An Illustrated Handbook of DNAPL Transport and Fate in the Subsurface: Bristol, Environment Agency R&D Publication, 67 p.

Lane, J., 2002, An integrated geophysical and hydraulic investigation to characterize a fractured-rock aquifer: U.S. Geological Survey Open-File Water Resources Investigation Report 01-4133, 97 p., <https://water.usgs.gov/ogw/bgas/publications/wri014133/>.

Lau, J.S.O., Auger, L.F., Bisson, J.G., 1987, Subsurface fracture surveys using a borehole television camera and acoustic televiewer: Canadian Geotechnical Journal, v. 24, p. 499–508, <https://doi.org/10.1139/t87-066>.

Lawn, B.R., Wilshaw, T.R., 1993, Fracture of brittle solids (2<sup>a</sup> ed): Cambridge University Press, London, 378 p.

Le Borgne, T., Bour, O., de Dreuzy, J.R., Davy, P., Touchard, F., 2004, Equivalent mean flow models for fractured aquifers: Insights from a pumping tests scaling interpretation: Water Resources Research, v. 40, no. 3, <https://doi.org/doi:10.1029/2003WR002436>.

Le Borgne, T., Bour, O., Paillet, F.L., Caudal, J.P., 2006, Assessment of preferential flow path connectivity and hydraulic properties at single-borehole and cross-borehole scales in a fractured aquifer: Journal of Hydrology, v. 328, p. 347–359, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.12.029>.

Lojkasek-Lima, P., 2018, Caracterização de detalhe do perfil vertical de contaminação em um aquífero cristalino fraturado e intemperizado Jurubatuba – São Paulo – SP [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, <https://doi.org/10.11606/T.44.2018.tde-03082020-112622>.

LUS – Laval Underground Survey, 2022, R-Cam 130 XLT Tech Specs Camera for Water: <https://lavalunderground.com/borehole-camera-head-attachments/r-cam-portable-water-well-camera/> (acessado Janeiro de 2022).

Maliva, R.G., 2016, Aquifer characterization techniques: Springer, Berlin, 615 p.

Markle, J.M., Rowe, R.K., Novakowski, K.S., 1995, A model for the constant-head pumping test conducted in vertically fractured media: International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, v. 19, p. 457-473, <https://doi.org/10.1002/nag.1610190702>.

Menezes, S.G., 2022, Modelo conceitual de aquífero fraturado com base em parâmetros hidráulicos, arranjo espacial e conectividade de fraturas [Dissertação de Mestrado]. São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 117 p., <https://doi.org/10.11606/D.44.2022.tde-07062022-071852>.

MSI – Mount Sopris Instruments, 2022: <https://mountsopris.com/borehole-well-logging-equipment/downhole-probes/> (acessado Janeiro 2022).

Molz, F.J., Boman, G.K., Young, S.C., Waldrop, W.R., 1994, Borehole flowmeters: field application and data analysis: Journal of Hydrology, v. 163, no 3-4, p. 347-371, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90148-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90148-1).

Morin, R.H., Hess, A.E., Paillet, F.L., 1988, Determining the distribution of hydraulic conductivity in a fractured limestone aquifer by simultaneous injection and geophysical logging: Ground Water, v. 26, p. 587–595, <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1988.tb00792.x>.

O’Leary, D.W., Freidman, J.D., Pohn, H.A., 1976, Lineament, linear, lineation: some proposed new definition for old terms: Geological Society of America, v. 87, p.1463-1469, [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1976\)87<1463:lllspn>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1976)87<1463:lllspn>2.0.co;2).

Paillet, F.L., 1993, Using borehole geophysics and cross-borehole flow testing to define hydraulic connections between fracture zones in bedrock aquifers: Journal of Applied Geophysics, v. 30, p. 261-279. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(93\)90036-X](https://doi.org/10.1016/0926-9851(93)90036-X).

Paillet, F.L., Keys, W.S., Hess, A.E., 1985, Effects of lithology on televiwer log quality and fracture interpretation: Society of Professional Well Log Analysts 26th Annual Logging Symposium, v. 2, p 1-31.

Paillet F.L., Hess A.E., Cheng C.H., Hardin E., 1987, Characterization of fracture permeability with high-resolution vertical flow measurements during borehole



pumping: *Groundwater*, v. 25, p. 28-40, <https://doi.org/doi:10.1111/j.1745-6584.1987.tb02113.x>.

Paillet, F.L., Ollila, P.W., 1994, Identification, characterization, and analysis of hydraulically conductive fractures in granitic basement rocks, Millville, Massachusetts: U.S. Geological Survey Open-File Water Resources Investigation Report 94-4185, p. 43, <https://doi.org/10.3133/wri944185>.

Paillet F.L., Williams J.H., Urik, J., Lukes, J., Kobr, M., Mares S., 2012, Cross-borehole flow analysis to characterize fracture connections in the Melechov Granite, Bohemian-Moravian Highland, Czech Republic: *Hydrogeology Journal*, v. 20, p. 143-154, <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0787-1>.

Pankow, J.F., Cherry, J.A., 1996, Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in Groundwater: History, Behavior and Remediation: Waterloo Press, Portland, 525 p.

Parker, B., Cherry, J., Chapman, S., 2012, Discrete fracture network approach for studying contamination in fractured rock: *AQUA mundi*, Am06052, p. 101-116, <https://doi.org/10.4409/Am-052-12-0046>.

Pino, D.S, Bertolo, R., Lojkasek-Lima, P., Fernandes, A.J., Parker, B.L., Hirata, R.C.A., 2021, Discrete fracture network characterization using multiple, high-resolution borehole methods in a crystalline rock aquifer in tropical Sao Paulo city, Brazil: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 105, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102911>.

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*, v. 20, p. 1529-1547, <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0893-8>.

Sartorio, F., 2019, Modelo conceitual do aquífero fraturado de uma área industrial em Barra Mansa, RJ [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 86 p., <https://doi.org/10.11606/D.44.2019.tde-09042021-082717>.

Schwarzenbach, R.P., Gschwend, P.M., Imboden, D.M., 2005, *Environmental Organic Chemistry* (2<sup>a</sup> ed.): John Wiley & Sons Inc, New Jersey, 1328 p.

Singhal, B.B.S., Gupta, R.P., 2010, *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks* (2<sup>a</sup> ed.): Springer Science & business Media, 400 p.

Snow, D.T., 1969, Anisotropic permeability of fractured media: Water Resources Research, Washington, v. 5, no. 6, p. 1273-1289, <https://doi.org/10.1029/WR005i006p01273>.

Suthersan, S., Payne, F., 2005, In Situ Remediation Engineering. CRC Press, Flórida, 532 p.

Terzaghi, R., 1965, Sources of error in joint surveys. Géotechnique, v. 15, p. 287-304, <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.3.287>.

Theis, C.V., 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and rate and duration of discharge of a well using groundwater storage: Transactions of the American Geophysical. Union, v. 2, p. 519-524.

Thiem, G., 1906, Hydrologische Methoden (Hydrological methods) [Tese de Doutorado]: Stuttgart, University of Stuttgart.

USEPA - United States Environmental Protection Agency, 2011, Environmental Cleanup Best Management Practices: Effective Use of the Project Life Cycle Conceptual Site Model: Office of Solid Waste and Emergency Response Open-File Report EPA 542-F11-011, 12 p.

USGS – United States Geological Survey, 2022, Digital Elevation Models (DEM) acquired by Shuttle Radar Topography Mission – SRTM: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. (Acessado Março 2022).

Van der Kamp, G., 2001, Methods for determining the in situ hydraulic conductivity of shallow aquitards – an overview: Hidrogeology Journal, v. 9, no. 1, p. 5-16, <https://doi.org/10.1007/s100400000118>.

Vaz, L.F., 1996, Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais: Solos e Rochas, v. 19, p. 117-136.

Vaz, L.F., Gurgueira, M.D., 2017, Solos em Geologia de Engenharia, *in*: Oliveira, A.M.S., Monticeli, J.J., org., Geologia de Engenharia e Ambiental: São Paulo, ABGE, p. 39-52.

Wiedemeier, T.H., Swanson, M.A., Moutoux, D.E., Gordon, E.K., Wilson, J.T., Wilson, B.H., Kampbell, D.H., Haas, P.E., Miller, R.N., Hansen, J. E., Chapelle F.H., 1998, Technical protocol for evaluating natural attenuation of chlorinated solvents in groundwater: U.S. Environmental Protection Agency Open-File Report EPA/600/R-98/128, Washington DC, United States.

Wiedemeier, T.H., Rifai, H.S., Newell, C.J., Wilson, J.T., 1999, Natural attenuation of fuels and chlorinated solvents in the subsurface. John Wiley & Sons, New Jersey, 632 p.

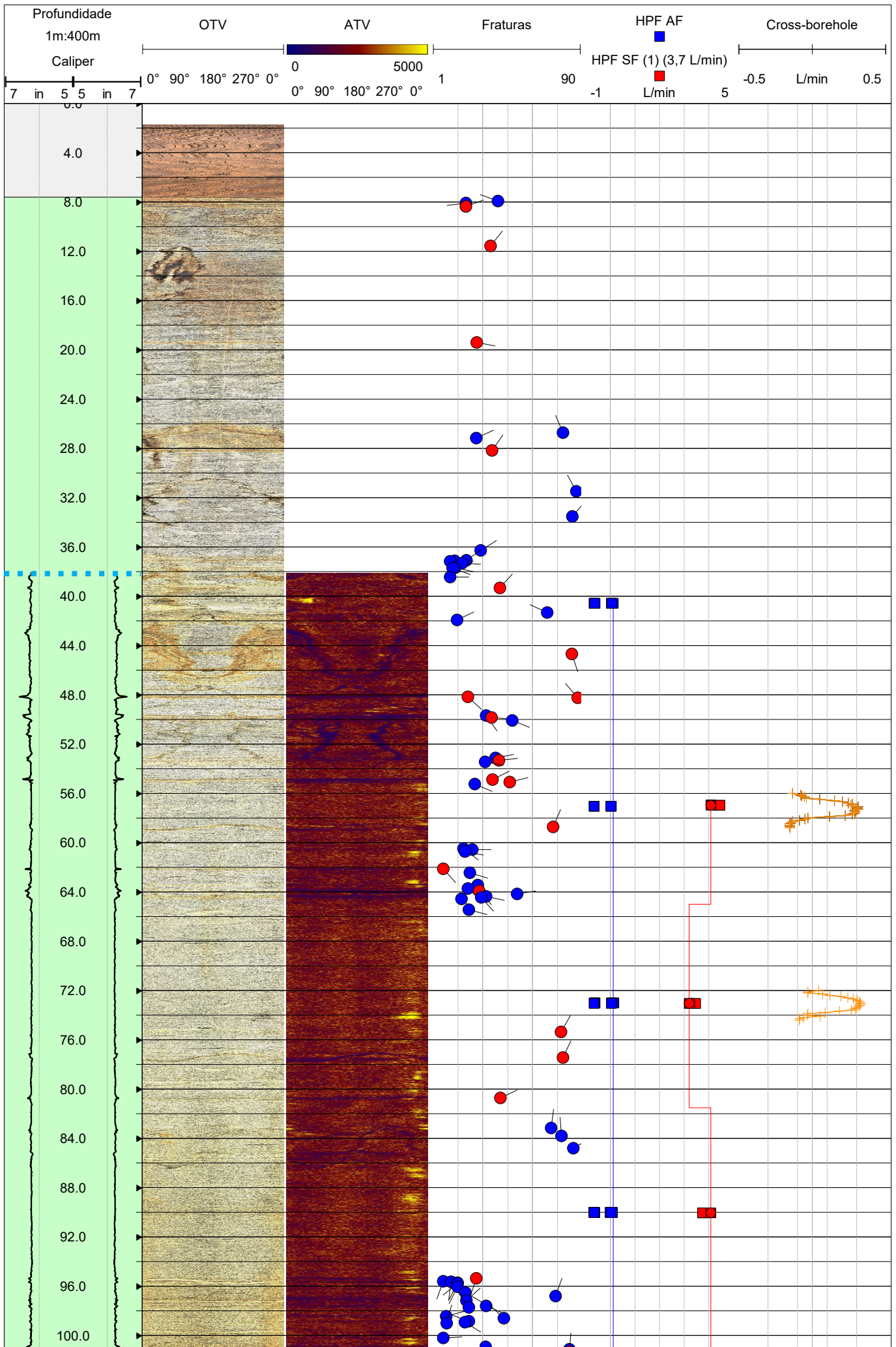
Williams, J.H., Paillet, F.L., 2002, Using flowmeter pulse tests to define hydraulic connections in the subsurface: A fractured shale example: Journal of Hydrology, v. 265, p. 100-117, [https://doi.org/ 10.1016/S0022-1694\(02\)00092-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00092-6).

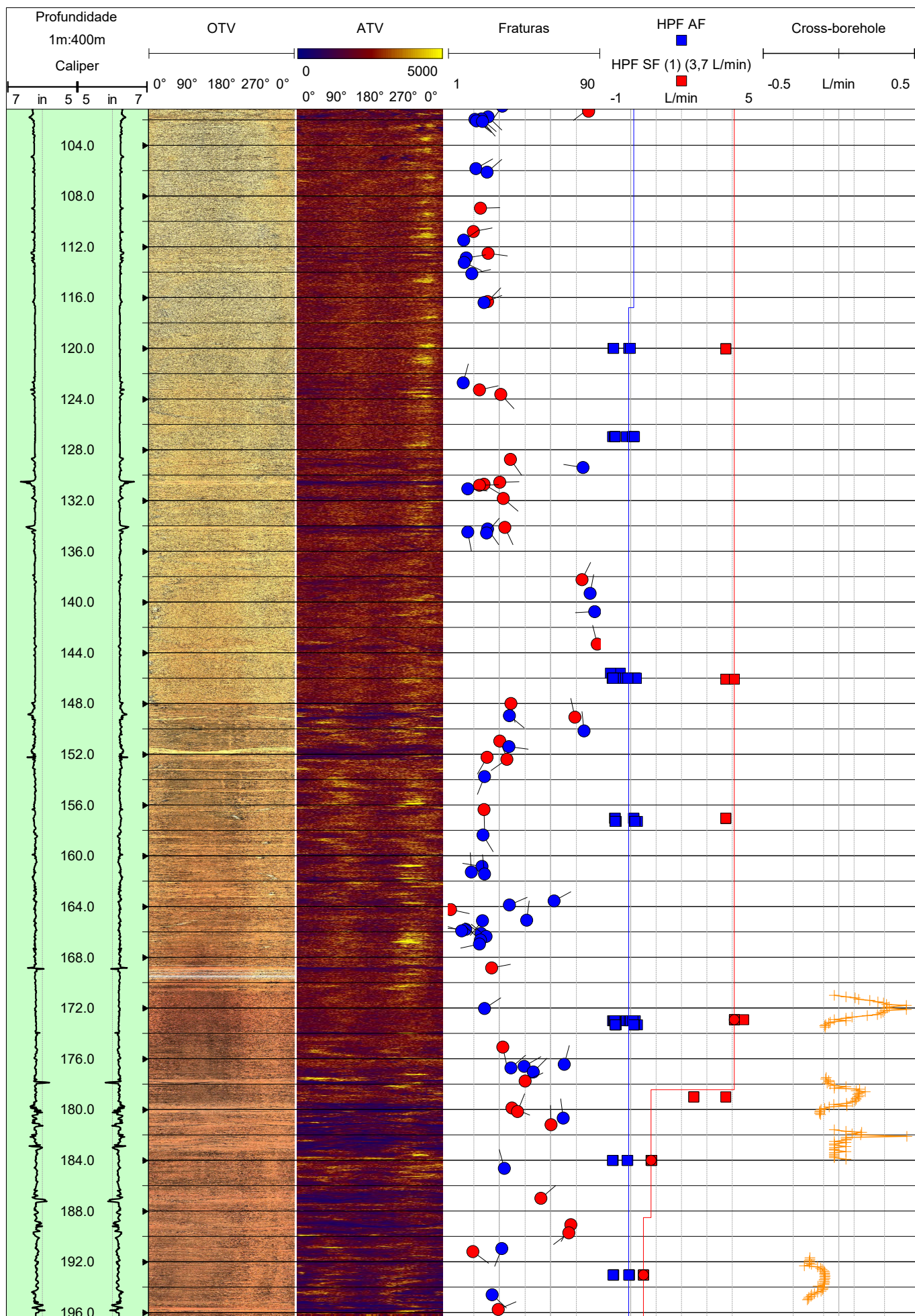
Williams, J.H., Johnson, C.D., 2004, Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies: Journal of Applied Geophysics, v. 55, p. 151-159, <https://doi.org/10.1016/J.JAPPGEO.2003.06.009>.

## **APÊNDICE A**

**PERFIS DOS POÇOS TUBULARES GERADOS NO SOFTWARE WELLCAD**

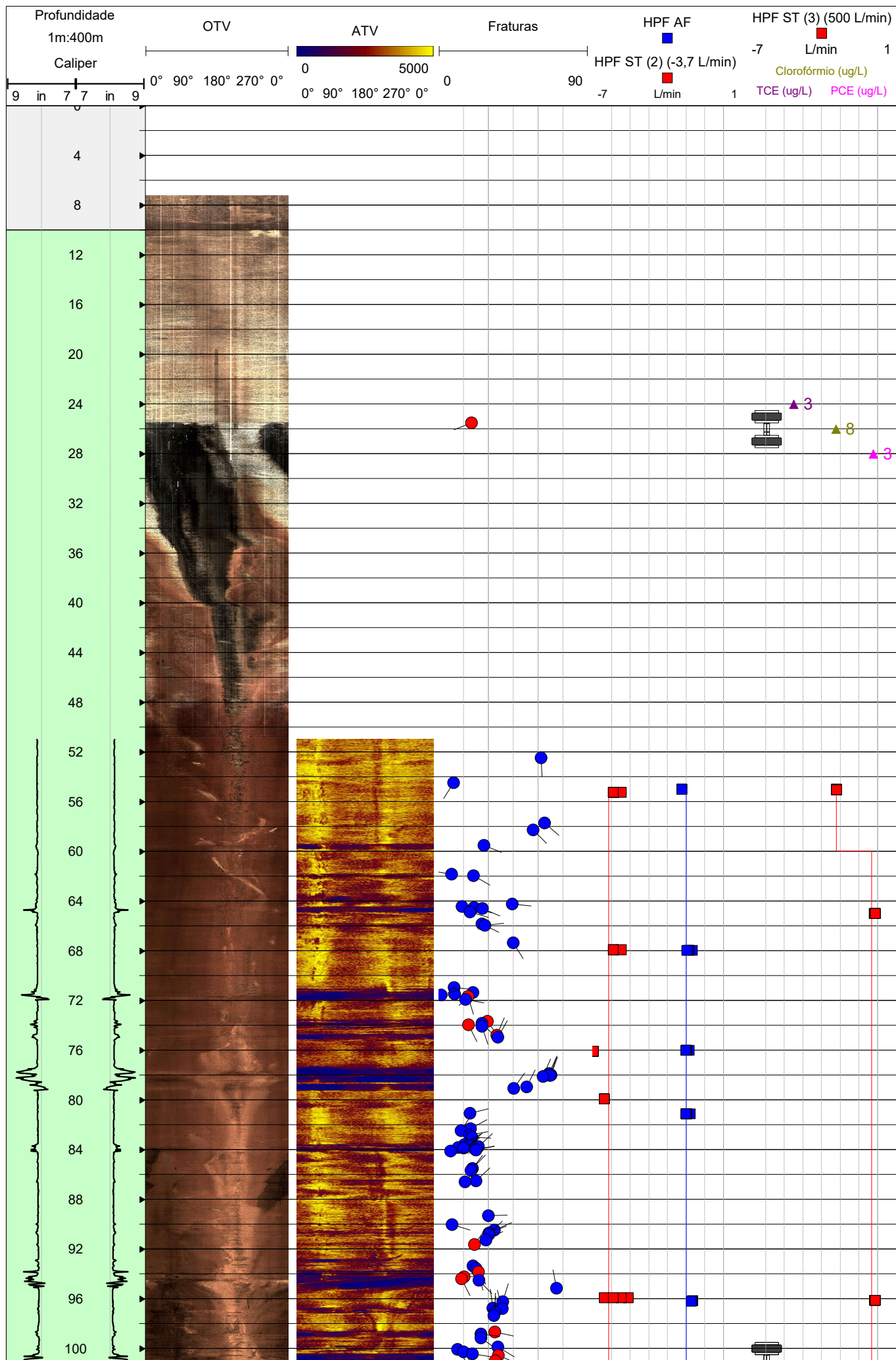
# Apêndice B - Perfil do poço tubular PT-A

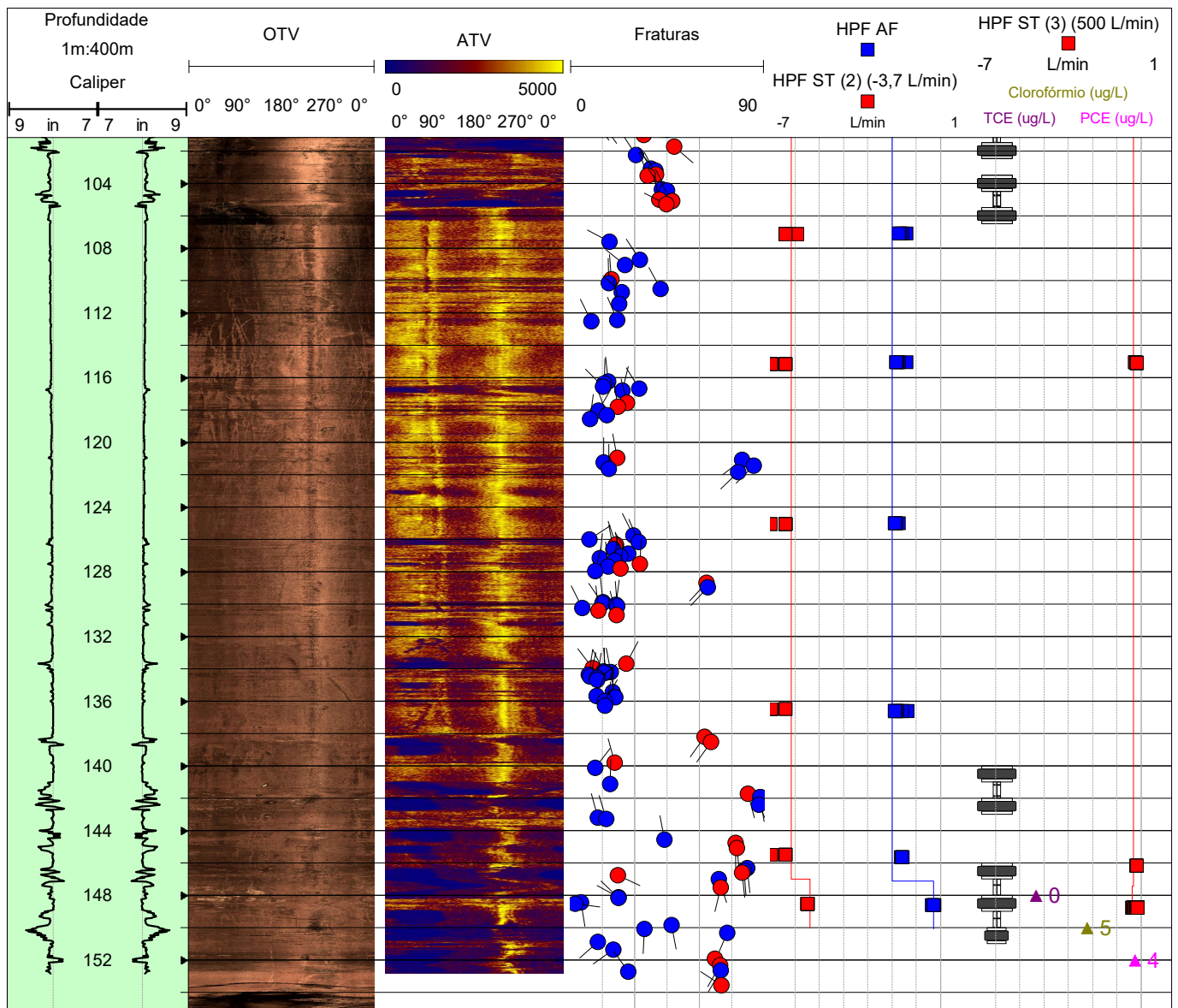




- Nível d'água
  - Granito
  - Fraturas com abertura aparente <10 mm
  - Revestimento
  - Obturadores
  - Fraturas com abertura aparente >10 mm
- HPF AF: Heat Pulse Flowmeter em fluxo ambiente
- HPF SF (2): Heat Pulse Flowmeter em fluxo induzido com o bombeamento do poço tubular PT-A (3,7 L/min)

# Apêndice B - Perfil do poço tubular PT-B





— Nível d'água

Granito

● Fraturas com abertura aparente <10 mm

Revestimento

Obturadores

● Fraturas com abertura aparente >10 mm

▲ Concentração dos contaminantes (ug/L)

HPF AF: Heat Pulse Flowmeter em fluxo ambiente

HPF SF (2): Heat Pulse Flowmeter em fluxo induzido com a injeção no poço tubular PT-B (3,7 L/min)

HPF SF (3): Heat Pulse Flowmeter em fluxo induzido com o bombeamento do poço tubular PT-A (500 L/min)



## **APÊNDICE B**

### **DADOS ESTRUTURAIS BRUTOS OBTIDOS PELAS PERFILAGENS GEOFÍSICAS**

PT-A Fractures			
Depth (m)	Azimuth (deg)	Dip (deg)	Apparent Aperture (mm)
7,92	290,42	40,03	0
8,06	262,06	20,81	0
8,34	69,73	20,81	11,22
11,57	38,5	35,75	11,89
19,4	100,44	27,47	7,1
26,72	336,56	79,33	0
27,17	65,6	27,02	0
28,17	34,63	36,5	12,59
31,49	331,53	87,26	0
33,53	41,38	85,05	0
36,27	58,71	29,79	0
37,07	54,35	21,06	0
37,14	90,89	14,01	0
37,17	100,66	11,37	0
37,32	93,18	18,37	0
37,68	102,79	14,36	0
37,73	110,04	12,86	0
38,45	90,75	11,5	0
39,33	42,06	41,22	19,38
41,3	294,54	69,85	0
41,93	64,56	15,4	0
44,67	161,66	84,71	1,24
48,16	133,58	22,1	45,1
48,26	319,77	88,22	8,58
49,68	145,29	33,18	0
49,83	94	36,24	38,91
50,1	112,14	48,66	0
53,12	79,78	38,66	0
53,3	84,04	40,65	11,7
53,45	99,93	32,59	0
54,9	63,28	36,79	44,28
55,08	76,17	47,33	21,05
55,24	112,99	26,32	0
58,74	23,06	73,42	12,77
60,49	127,48	19,36	0
60,57	90,5	24,87	0
60,7	101,03	20,35	0
62,14	138,18	7,1	44,77
62,44	107,01	23,35	0
63,45	153,33	27,96	0
63,73	131,46	22,04	0
63,91	138,2	28,97	46,61
64,16	80,34	51,65	0
64,35	102,32	32,94	0
64,44	138,4	29,95	0
64,55	133,38	18,14	0
65,46	105,95	22,55	0
75,35	29,29	78,2	12,58
77,43	25,17	79,37	13,52
80,73	65,12	41,78	20,12
83,17	7,39	72,24	0
83,8	354,8	78,3	0
84,79	60,04	85,58	0
95,37	198,37	27,25	23,87
95,61	199,82	7,11	0
95,65	186,89	12,12	0
95,72	207,35	15,97	0
95,74	230,36	15,78	0
96,04	207,23	15,76	0
96,51	120,86	20,51	0
96,82	19,36	74,92	0
97,17	47,87	21,2	0
97,58	113,31	32,89	0
97,73	324,77	22,79	0
98,43	74,99	8,94	0
98,58	312,6	43,68	0

PT-A Fractures			
Depth (m)	Azimuth (deg)	Dip (deg)	Apparent Aperture (mm)
98,85	290,09	22,63	0
98,92	122,64	20,25	0
99	14,82	9,19	0
100,22	86,43	7,22	0
100,93	215,41	32,85	0
101,12	232,8	83,2	0
101,34	4,44	83,32	6,23
101,77	134,06	24,49	0
101,91	131,27	20,67	0
101,97	126,03	16,79	0
102,08	126,69	17,61	0
102,12	138,82	21,09	0
105,82	60,34	17,35	0
106,12	49,14	23,84	0
108,97	88,93	19,98	17,09
110,82	79,45	15,98	15,02
111,48	55,54	10,06	0
112,52	97,5	24,33	23,08
112,87	81,45	11,73	0
113,22	114,9	10,44	0
114,13	77,42	14,88	0
116,32	43,88	24,07	10,93
116,39	68,05	21,96	0
122,71	14,59	10,02	0
123,26	77,42	19,48	23,05
123,64	136,57	31,94	20,05
128,77	145,23	37,41	13,54
129,41	278,71	80,01	0
130,56	87,97	31,14	57,83
130,7	120,99	22	15,68
130,79	88,53	19,37	22,43
131,07	95,44	12,7	0
131,83	131,4	33,45	11,32
134,12	154,79	34,32	41,6
134,23	144,11	24,22	0
134,46	170,04	12,54	0
134,57	41,25	23,6	0
138,22	26,4	79,28	7,39
139,3	10,14	84,17	0
140,74	266,74	86,63	0
143,33	345,68	88,07	6,19
148,02	167,12	37,76	28,64
148,97	129,76	36,98	0
149,07	348,04	75,07	10
150,14	354,26	80,6	0
150,96	157,45	31,22	14,25
151,38	96,9	36,69	0
152,23	210,87	23,8	23,38
152,42	235,19	35,49	16,65
153,75	201,32	22,32	0
156,38	178,58	22,21	21,4
158,35	149	21,57	0
160,85	278,69	20,86	0
161,27	356,86	14,53	0
161,42	353,84	22,49	0
163,57	61,24	63,07	0
163,87	66,86	36,94	0
164,23	102,32	2,42	9,83
165,08	8,16	47,13	0
165,12	219,96	21,23	0
165,82	273,24	11,28	0
165,9	286,72	9,02	0
166,12	303,01	20,4	0
166,36	309,49	23,15	0
166,64	311,48	19,84	0
166,94	257,7	19,3	0

PT-A Fractures			
Depth (m)	Azimuth (deg)	Dip (deg)	Apparent Aperture (mm)
168,85	79,05	26,52	30,08
172,02	56,88	22,5	0
175,06	167,79	32,94	12,55
176,43	14,82	69,08	0
176,62	60,82	45,54	0
176,72	48,85	37,74	0
177,02	45,37	50,72	0
177,77	65,25	46,03	61,48
179,86	110,95	38,47	50,36
180,16	21,06	41,7	35,6
180,66	351,89	68,39	0
181,18	357,82	61,21	26,67
184,66	344,98	33,94	0
186,99	49,19	55,38	17,82
189,08	210,6	72,67	33,53
189,71	233,09	71,53	12,59
190,96	201,7	32,45	0
191,2	126,52	15,46	16,35
194,6	133,54	26,71	0
195,75	65,96	30,38	35,28

PT-B Fractures			
Depth (m)	Azimuth (deg)	Dip (deg)	Apparente Aperture (mm)
25,51	247,99	19,8	21,5
52,49	176,84	61,74	0
54,48	212,46	8,9	0
57,73	131,26	63,97	0
58,28	134,48	56,88	0
59,52	111,53	27,22	0
61,85	278,76	7,76	0
61,97	119,33	21,12	0
64,24	96,01	44,32	0
64,44	101,2	14,22	0
64,51	107,03	21,38	0
64,61	112,95	26,44	0
64,87	106,13	19,01	0
65,85	116,48	25,99	0
65,97	84,28	27,78	0
67,35	147,81	44,91	0
70,95	95,77	9,43	0
71,35	227,69	20,74	0
71,46	259,15	9,68	0
71,55	75,45	1,48	0
71,69	162,39	17,62	65,63
71,92	100,71	16,16	0
73,67	145,37	29,29	37,16
73,83	135,58	26,02	0
73,95	153,54	18,11	34,59
74,08	161,32	26,07	0
74,81	23,67	35,09	18,68
74,96	29,94	35,62	6,17
77,88	24,25	66,68	5,45
77,99	20,08	67,82	0
78,05	20,16	67,25	0
78,13	22,93	63,11	0
78,97	27,16	53,11	0
79,06	34,76	45,23	0
81,09	76,36	18,97	0
82,31	61,05	19,17	0
82,46	32,79	13,59	0
82,83	80,02	18,49	0
82,99	93,27	20,2	0
83,59	57,32	15,49	0
83,67	48,03	18,07	0
83,74	47,07	24	0
83,83	57,95	11,84	0
83,9	57,53	14,95	0
83,97	82,23	21,83	0
84,02	77,93	22,64	7,24
84,12	95,88	7,17	0
85,51	44,08	20,45	0
85,66	38,19	19,4	0
86,51	46,6	22,38	0
86,61	42,13	15,96	0
89,3	88,56	29,96	0
90,03	107,04	8,14	0
90,47	66,53	33,67	0
90,73	68,55	30,18	0
90,83	44,75	30,25	0
91,28	63,98	28,56	0
91,66	35,75	21,55	21,53
93,37	151,31	20,65	0
93,55	148,07	22,53	0
93,85	165,61	24,09	24,22
94,26	89,13	15,24	32,43
94,41	152,85	13,95	21,5
94,51	135,81	24,25	0
95,16	349,2	71,19	0
96,24	16,7	38,58	0
96,75	352,48	32,76	0
96,82	344,92	38,28	0
97,06	1,88	33,88	0

PT-B Fractures			
Depth (m)	Azimuth (deg)	Dip (deg)	Apparente Aperture (mm)
97,34	5,76	33,4	0
98,68	102,77	34,02	24,37
98,85	97,82	25,42	0
99,17	124,78	25,41	0
99,86	121,05	35,64	0
100,1	144,25	11,49	0
100,29	145,52	14,95	0
100,45	98,93	20,54	0
100,58	113,38	36,05	36,9
101,01	96	34,13	83,85
101,7	130,84	48,38	17,29
102,23	326,75	30,65	0
103,07	329,41	37,61	0
103,18	320,38	39,64	0
103,43	331,93	39,77	15,98
103,53	339,43	36,12	18,35
104,35	326,27	42,48	0
104,44	331,16	44,93	2,63
104,99	347,79	41,29	34,74
105,1	327,36	47,3	10,2
105,27	295,83	44,78	18,5
107,58	297,48	18,32	0
108,71	327,06	32,3	0
109,06	309,04	25,49	0
109,92	355,57	19,2	19,95
110,16	358,25	18,14	0
110,5	331,6	42,05	0
110,71	311,32	23,89	0
111,43	346,64	22,85	0
112,45	335,93	21,78	0
112,54	333,51	10,01	0
116,24	354,61	17,75	0
116,37	0,95	15,89	0
116,55	315,2	15,4	0
116,67	327,86	32,23	0
116,8	13,95	24,26	0
117,55	346,86	26,38	15,26
117,79	350,29	22,06	15,85
118,03	29,43	13,12	0
118,34	340,64	16,96	3,7
118,57	6,9	9,38	0
120,97	348,91	21,88	21,14
121,08	231,93	79,81	0
121,23	0,39	15,51	0
121,43	225,54	85,27	0
121,65	359,58	17,99	0
121,84	225,93	78,02	0
125,76	333,97	29,35	0
125,99	56,49	9,1	0
126,17	337,42	31,74	0
126,33	340,93	21,25	26,62
126,6	349,98	19,97	0
126,88	328,29	26,88	0
127,03	347,55	23,34	0
127,14	6,54	13,69	0
127,3	5,87	20,76	0
127,53	3,66	32,32	12,21
127,68	354,3	17,78	0
127,8	5,88	23,32	15,37
127,96	13,13	11,63	0
128,7	222,23	63,16	9,28
128,97	222,24	64,01	0
129,89	353,8	15,45	0
129,96	325,54	15,08	0
130,05	7,83	21,36	0
130,12	356,11	21,98	0
130,24	333,78	5,76	0
130,38	353,44	13,07	39,29
130,67	344,07	21,46	19,36

PT-B Fractures			
Depth (m)	Azimuth (deg)	Dip (deg)	Apparente Aperture (mm)
133,66	28,09	26,23	27,55
133,97	322,02	10,36	23,05
134,16	333,75	15,48	0
134,19	349,54	18,98	0
134,23	355,66	16,57	0
134,26	0,25	15,79	0
134,37	9,02	8,71	0
134,48	14,01	9,32	0
134,55	9,22	12,53	0
134,68	51,51	12,66	0
135,44	1,41	19,67	0
135,67	22,18	12,15	0
135,74	349,15	21,01	0
135,98	30,6	16,07	0
136,29	14	16,07	0
138,21	214,56	62,41	13,52
138,52	215,7	65,34	9,86
139,8	345,01	20,74	19,36
140,1	38,05	11,73	7,44
141,11	2,19	18,54	0
141,71	164,59	82,48	15,32
141,92	171,27	88,06	5,73
142,42	155,68	87,65	0
143,2	344	12,86	0
143,27	343,57	16,84	0
144,54	349,53	43,92	0
144,74	180,64	76,94	15,52
145,07	174,55	77,26	7,09
146,3	173,4	82,2	0
146,47	174,94	80,8	0
146,6	173,79	79,67	6,98
146,76	115,62	22,13	14,36
147,01	161,51	68,93	3,55
147,51	193,85	69,83	18,2
148,12	298,96	22,61	0
148,18	313,65	22,54	0
148,45	170,51	4,95	0
148,54	97,86	2,41	0
149,86	168,71	47,05	0
150,06	182,79	34,39	0
150,31	203,12	72,88	0
150,89	227,92	13	0
151,37	235,47	20,07	0
151,92	175,51	67,05	10,23
152,31	209,42	69,5	11,24
152,65	210,79	69,86	0
152,7	323,72	26,85	0
153,55	303,68	70,08	10,44

## **APÊNDICE C**

### **DADOS BRUTOS DOS ENSAIOS HIDRÁULICOS REALIZADOS COM HPF**

HPF Ambient Flow - PT-A	
Depth (m)	Flow (l/min)
40,57	0,113723
40,57	0,0468695
40,57	0,048177
40,57	0,0635739
57,03	0,0487496
57,03	0,0279588
57,03	0,0278781
73,02	0,131937
73,02	0,0518294
73,02	0,0421706
73,02	0,0391976
89,99	0,0405545
89,99	0,0823897
89,99	-0,0287374
90	0,0365345
120	-0,058785
120,01	-0,0786599
120,01	-0,0253305
126,96	-0,180652
126,96	0,053695
126,97	0,116953
126,97	0,119067
126,97	0,137434
145,59	-0,41007
145,98	-0,0186455
145,98	0,155569
145,98	0,169098
145,98	0,169098
146	0,138009
146	0,138589
146,01	0,211119
146,01	-0,124668
146,01	-0,194878
146,01	-0,129807
157,04	0,108477
157,04	0,113331
157,04	0,125891
157,04	0,129858
157,29	0,254766
157,29	0,157048
157,29	0,145302
157,29	0,150604
173,01	-0,182131
173,01	-0,052815
173,01	-0,0194862
173,01	0,178206
173,01	0,083014
173,32	0,250931

HPF Ambient Flow - PT-A	
Depth (m)	Flow (l/min)
173,32	0,144665
173,32	0,121706
173,32	0,115316
184,01	-0,129807
184,01	-0,132139
184,01	-0,132935
193,03	-0,0502618
193,03	-0,0689889
193,03	-0,0668792
193,03	-0,0731405

HPF Stressed Flow (3,7 l/min) - PT-A	
Depth (m)	Flow (l/min)
56,94	4,070
56,94	4,449
56,94	4,449
56,94	4,070
73,02	3,204
73,02	3,430
73,03	3,461
73,03	3,213
90,04	3,744
90,04	3,744
90,04	4,070
120,03	3,744
120,03	3,744
120,03	3,744
146,09	3,744
146,09	3,744
146,09	4,070
157,03	3,744
157,04	3,744
157,04	3,744
172,93	4,070
172,93	4,449
172,93	4,070
172,93	4,070
178,99	3,744
178,99	2,477
178,99	2,477
184	0,799
184	0,818
184	0,818
184,01	0,818
193,03	0,494
193,03	0,501
193,03	0,494



HPF Ambient Flow - PT-B	
Depth (m)	Flow (l/min)
55,01	-2,22528
55,01	-2,22528
55,01	-2,22528
67,96	-1,67914
67,96	-1,83081
67,96	-1,88719
67,96	-1,94689
75,98	-1,83081
75,99	-1,94689
75,99	-2,01021
75,99	-2,01021
75,99	-2,01021
81,11	-1,77749
81,11	-1,94689
81,11	-2,01021
81,11	-2,01021
81,11	-2,01021
96,18	-1,63371
96,18	-1,67914
96,18	-1,72701
107,08	-1,40339
107,09	-1,59053
107,09	-1,67914
107,09	-1,72701
115,03	-1,40339
115,03	-1,72701
115,03	-1,77749
115,04	-1,83081
115,04	-1,83081
124,99	-1,72701
124,99	-1,83081
124,99	-1,88719
124,99	-1,88719
136,6	-1,37087
136,6	-1,59053
136,6	-1,77749
136,6	-1,83081
136,6	-1,88719
136,6	-1,88719
145,65	-1,63371
145,65	-1,59053
145,65	-1,54945
145,65	-1,59053
148,59	-0,247585
148,59	-0,36823
148,59	-0,269736
148,59	-0,271082

HPF Stressed Flow (-3,7 l/min) - PT-B	
Depth (m)	Flow (l/min)
55,23	-5,47947
55,23	-5,90666
55,23	-5,90666
55,23	-5,90666
67,91	-5,47947
67,91	-5,90666
67,92	-5,90666
76,08	-6,96014
76,08	-6,96014
76,08	-6,96014
79,92	-6,39577
79,92	-6,39577
79,92	-6,39577
95,92	-5,10381
95,92	-5,47947
95,92	-6,39577
95,92	-5,90666
107,12	-5,90666
107,12	-6,39577
107,12	-6,39577
107,13	-6,39577
115,15	-6,39577
115,15	-6,96014
115,16	-6,96014
115,16	-6,39577
125,04	-6,39577
125,04	-6,39577
125,04	-7,61694
125,04	-6,39577
136,5	-6,39577
136,5	-6,96014
136,5	-6,96014
145,47	-6,39577
145,47	-6,39577
145,47	-6,96014
148,52	-5,47947
148,52	-5,47947
148,52	-5,47947

HPF Stressed Flow (Pump PT-A) - PT-B	
Depth (m)	Flow (l/min)
55,02	-2,2
55,02	-2,2
55,02	-2,2
55,02	-2,2
55,02	-2,2
65	-0,163376
65	-0,131353
65	-0,117361
65	-0,111986
96,13	-0,159843
96,13	-0,148084
96,13	-0,140552
96,13	-0,132139
96,13	-0,128296
115,06	-0,249028
115,06	-0,189897
115,06	-0,179196
115,06	-0,172252
115,06	-0,165819
146,16	-0,200121
146,16	-0,185161
146,16	-0,170927
148,75	-0,348259
148,75	-0,338
148,75	-0,294398
148,76	-0,238474
148,76	-0,266686
148,76	-0,23597
148,76	-0,205649
148,76	-0,198343
148,76	-0,183634
148,76	-0,152157
148,76	-0,154277
148,76	-0,134556
148,76	-0,137063
148,76	-0,135382