

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PERFILAGENS GEOFÍSICAS E ENSAIOS PARA MEDIÇÃO DE FLUXO EM ANTIGOS
POÇOS DE ABASTECIMENTO NO BAIRRO DE JURUBATUBA, SÃO PAULO.**

Marcos Akira Nakacima Ueda

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo A. Bertolo

Coorientador: MSc. Marcos B. Barbosa

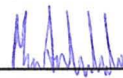
MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF – 2017/35)

SÃO PAULO
2017

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PERFILAGENS GEOFÍSICAS E ENSAIOS PARA MEDIÇÃO DE FLUXO EM ANTIGOS
POÇOS DE ABASTECIMENTO NO BAIRRO DE JURUBATUBA, SÃO PAULO.**

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF – 2017/35)



Marcos Akira Nakacima Ueda



Prof. Dr. Reginaldo A. Bertolo

*Dedico esta monografia às memórias de
Kime Nakacima e Fakudi Nakacima*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que fizeram parte de minha trajetória e que moldaram a pessoa que sou até o presente momento. Bem, isso ficou muito geral, então daremos “nomes aos bois”.

Primeiramente aos meus progenitores e mais do que isso, exemplos de vida. Carlos Hiroshi, a pessoa que pode ser definida pelas palavras bondade e honestidade e Célia Aiko, a mulher mais guerreira e perseverante de todas.

Agradeço aos meus avós Akira Ueda e Sizuca Ueda pelos sábios conselhos adquiridos de maneira empírica com os longos anos de experiência de vida.

Agradeço a oportunidade de fazer parte do grupo de pesquisa do CEPAS e a todos que me forneceram suporte, sobretudo ao Professor Dr. Reginaldo Bertolo, por me orientar em um ano conturbado e ao Msc. Marcos Barbosa, por ser meu co-orientador e pela paciência para ensinar e auxiliar de diversas formas.

À minha “irmã” Fernanda pelo companheirismo, Alexandre, Vinícius e Gigi por serem meus irmãos mais novos e aos demais primos e primas Ueda que sempre tive ótimo convívio. Aos tios e tias que sempre me apoiaram, com destaque ao Sérgio Kiyoshi e ao Roberto Hiroyuki, que sempre me ofereceram suporte.

Ao tio Márcio e tia Emiko que impulsionaram meu pensamento crítico. Aos primos, Yukio, André, Naoki e Ryuichi que sempre segui os exemplos por ser o “menor da turma” de uma geração de “macacada”.

Agradeço às amizades que só a geologia pode proporcionar, com destaque aos mais próximos como o Tomilhe e seus “bandejamentos” eternos, o Milani e o Hideu (melhor quarto de sempre), o Avatar e seus vacilos, o Vagi meu parça de fritaço, o Jorge por sempre estar errado, a Geysi pelas pistolagens, o Wesley pelas caronas e resenhas, a Mic e sua aura radiante, o Seiji meu primo latifundiário do Sul, o Pedrita e a Gi pelo “Fordismo” que foi map. geo. e o Érick pelas “estórias de vida”.

Por fim, gostaria de agradecer o Prof. Dr. Paulo César Fonseca Giannini por ser meu orientador por quase 2 anos e meio em minha iniciação científica e por ser o exemplo de Professor e pesquisador que é. Assim como o Giannini, devo agradecer ao meu co-orientador durante a IC, o Dr. Vinícius Ribau Mendes que é um exemplo de pessoa e um exímio pesquisador.

Aos que não tiveram os nomes mencionados, mas que merecem minha gratidão, ficam registrados o pedido de desculpas e o agradecimento.

RESUMO

A região do canal do Jurubatuba situada na zona Sul de São Paulo, é conhecida pelo extenso parque industrial que possui um extenso histórico remetendo a meados da década de 50. O desenvolvimento da indústria resultou em um aumento da densidade populacional devido a demanda de mão-de-obra. Além disso, a atividade industrial gerou passivos ambientais tais como a contaminação do aquífero fraturado por organoclorados comprometendo a qualidade da água extraída pelos poços de produção.

Contudo, os estudos acerca de contaminação em aquíferos fraturados, tanto localmente quanto no Brasil como um todo, ainda se encontram em fase inicial. Por isso, é de suma importância a aplicação e aprimoramento de técnicas de investigação neste tipo de aquífero.

Sendo assim, o presente estudo foi desenvolvido com os objetivos de realizar a caracterização estrutural e perfilagem de fluxo em três poços instalados no shopping SP Market. O trabalho busca, por meio do levantamento de dados de campo qualitativos e quantitativos, aprimorar o conhecimento da hidrodinâmica do aquífero para possibilitar a elaboração de um modelo matemático para o aquífero fraturado.

A coleta de dados de campo foi realizada com os seguintes ensaios: 1 – Filmagem do poço. 2 – Perfilagens acústica, gama e calibre. 3 – Perfilagens de fluxo. Os dados geofísicos foram tratados no *software* Wellcad. A perfilagem de fluxo sob condições ambiente e com bombeamento, é um método inédito no Brasil e foi trabalhada na planilha FLASH – *Flow-Log Analysis of Single Holes* disponibilizada pela USGS (Serviço Geológico dos Estados Unidos).

Os resultados permitiram a correlação entre as estruturas identificadas e as variações de fluxo com a profundidade. Com base nesta correlação, definiu-se algumas zonas com a presença de fraturas mais transmissivas que controlam a entrada e saída de água do poço.

ABSTRACT

The region of the Jurubatuba canal located in the south of São Paulo is known for its extensive industrial park, which has an extensive history dating back to the mid 50's. The development of the industry has resulted in an increase in population density due to the demand for labor. In addition, the industrial activity generated environmental liabilities such as the contamination of the aquifer fractured by organochlorines that compromises the quality of the water extracted by the production wells.

However, studies on contamination in fractured aquifers, both locally and in the entire Country, are still in the initial phase. Thus, the application and improvement of research techniques in this type of aquifer are fundamental.

Therefore, the present study was developed with the objectives of performing the structural characterization and flow profile in three wells located in the SP Market mall. The research seeks to improve the knowledge of the hydrodynamics of the aquifer in order to enable the elaboration of a mathematical model for the fractured aquifer, by collecting qualitative and quantitative field data.

Field data collection was performed with the following tests: 1 - Well filming. 2 – Acoustic and Gama profiles. 3 – Flow-log profiles. Geophysical data were processed in Wellcad software. The flow profile under ambient and pumping conditions is an unpublished method in Brazil and was processed using the FLASH - Flow-Log Analysis of Single Holes worksheet provided by the USGS.

The results allowed the correlation between the identified structures and the flow variations with the depth. Based on this correlation, it was defined some zones with the presence of more transmissive fractures that control the entrance and exit of water from the well.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS E RELEVÂNCIA.....	2
3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1. Geologia regional	3
3.2. Caracterização Hidrogeológica	5
3.3. Fundamentos Teóricos.....	6
3.4. Métodos de investigação e suas aplicações.....	7
4. MATERIAIS E MÉTODOS	9
4.1. Filmagem do poço.....	11
4.2. Perfilagem acústica, gama e caliper	12
4.3. Perfilagem de fluxo de água subterrânea	13
4.4. Wellcad	15
5. RESULTADOS	17
6. DISCUSSÃO	31
6.1. Poço 255.....	31
6.2. Poço 256.....	32
6.3. Poço 1204.....	34
6.4. Discussão Integrada	35
7. CONCLUSÕES.....	37
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38

ANEXOS

Anexo A - Logs de filmagem em maior detalhe

Anexo B - Perfis confeccionados no Wellcad em maior detalhe

1. INTRODUÇÃO

A região próxima ao canal do Jurubatuba localizada na zona Sul de São Paulo sempre foi figura de destaque no cenário da industrialização da capital paulista. Nas décadas de 50 e 60, a cidade passou por um intenso processo de ampliação do setor industrial e uma das principais mudanças foi a expansão do parque industrial de Santo Amaro devido à disponibilidade de área, energia, água e também a facilidade de escoamento dos produtos com a construção das marginais do rio Pinheiros. O setor compreendido pelo Jurubatuba ganhou destaque pela concentração de empresas que atuam nos diversos setores da indústria de transformação (PMSP, 2017).

Devido à intensa ocupação industrial da área, resultante da expansão do setor na metade do século XX, instituiu-se a Zona de Uso Predominantemente Industrial 131 (ZUPI 131). Com o desenvolvimento acelerado do setor industrial, ocorreu o aumento da demanda de mão de obra e consequentemente a expansão urbana regional. Neste período, diversas marcas de grande porte nacionais e internacionais se instalaram na região da Av. das Nações Unidas, na várzea do canal do Jurubatuba, como foi o caso da Monark, Wapsa, Walita e MWM. Outra grande marca que atuou na região entre as décadas de 1960 a 1990 foi a Caterpillar Brasil S/A, empresa norte americana de produção de maquinário provido de motores movidos à diesel (Coelho, 2007). A Caterpillar era sediada no terreno onde atualmente é localizado o Shopping SP Market, e é também o local onde foram instalados os três poços estudados neste trabalho (Figura 1).

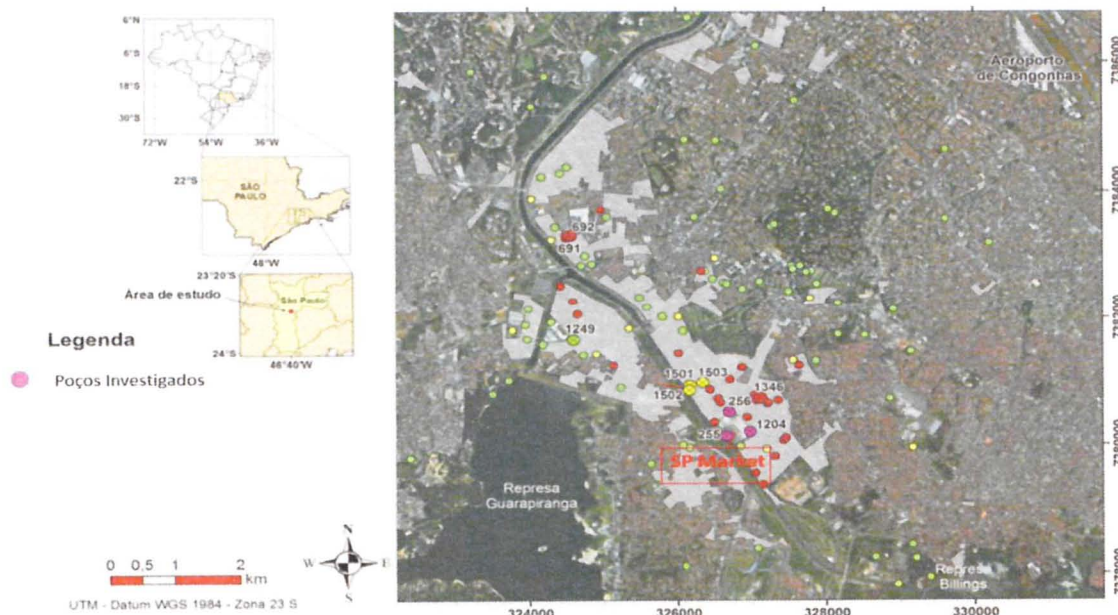


Figura 1. Localização da área de interesse para o estudo e dos poços investigados (Adaptado de Fiume, 2013)

Como consequência de décadas de ocupação e uso industrial, diversos passivos ambientais foram gerados na região. Porém somente no início do século XXI que a região passou a ser alvo de estudos ambientais para diversos órgãos reguladores tais como a Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental (CETESB) a partir de 2001, o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e a Vigilância em Serviços de Saúde (COVISA) a partir de 2005. Estes estudos concluíram que a região merecia maior atenção, primeiro devido principalmente à contaminação por organoclorados e segundo pela demanda desta água para o abastecimento privado. Desta forma, a área foi classificada como “Área de Restrição e Controle Temporário da água subterrânea” e posteriormente em 2009 como área contaminada crítica, resultando na interrupção da produção de água dos poços de abastecimento (DAEE, 2009).

Outro fator agravante é a demanda de recursos hídricos da população e de empresas instaladas na região, uma vez que, os passivos ambientais inviabilizaram a produção de água subterrânea por tempo indeterminado. De acordo com a Prefeitura Municipal de São Paulo – PMSP (2016), a área denominada Arco Jurubatuba e suas redondezas, conta com uma população e aproximadamente 1 milhão e 600 mil habitantes além de um denso parque industrial com empresas do setor de transformação.

Portanto, estudos que aprimorem os conhecimentos acerca dos contaminantes presentes na região, bem como seus mecanismos de transporte, são necessários. Contudo, para se estudar o transporte de contaminantes, é preciso primeiro, entender a dinâmica do aquífero cristalino. Sendo assim, a coleta e interpretação de dados através de ensaios de campo torna-se essencial para o aperfeiçoamento de um modelo regional mais acurado.

Em âmbito nacional, o trabalho é relevante pois utiliza o método de perfilagem de fluxo com bombeamento que até então é inédito no país. Este ensaio vem sendo utilizado em outros países como Canadá e Estados Unidos e é importante pois induz fraturas que não são detectadas no fluxo natural a se manifestarem sob estresse.

2. OBJETIVOS E RELEVÂNCIA

Os estudos de aquíferos cristalinos no Brasil, em geral, limitam-se às suas respectivas produtividade e capacidade de armazenamento. Em contrapartida, os estudos acerca da dinâmica do fluxo ainda estão em desenvolvimento quando comparados com os conhecimentos sobre o transporte em aquíferos sedimentares. Esta diferença ocorre principalmente devido ao grau de complexidade do comportamento hidráulico em meio fraturado. Sendo assim, os

principais objetivos deste trabalho são: Realizar a análise estrutural e perfilagem de fluxo dos poços instalados no shopping SP Market.

O estudo será utilizado para alimentar a base de dados do aquífero fraturado na região do canal do Jurubatuba. Além de aprimorar as técnicas de investigação em aquíferos fraturados no Brasil pela aplicação, inédita no país, do método de perfilagem de fluxo (*flowmeter*) com bombeamento.

Ainda que embrionária, a base de dados da região será utilizada em trabalhos futuros para a elaboração de um modelo matemático hidrogeológico.

3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Geologia regional

A área de estudo está inserida na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) que é subdivida em ao menos dois contextos geológicos distintos: a Bacia de São Paulo de idade Cenozoica e o embasamento Pré-Cambriano (Coutinho, 1980 e Perrotta *et al.*, 2005).

Hasui (1975) propôs o termo complexo Embu para discriminar as rochas cristalinas presentes na RMSP. Tais rochas foram descritas como metassedimentares Meso a Neoproterozóicas de médio a baixo grau metamórfico, com ocorrência predominante na porção sudeste do Estado de São Paulo. Heilbron *et al.* (2004), apresenta uma síntese acerca do terreno Embu que está inserido na porção central da Província Mantiqueira definida por Almeida *et al.* (1967).

Em 1991, Fernandes dividiu o terreno Embu em três unidades estratigráficas: A primeira é a Redenção da Serra, constituída gnaisses peraluminosos e tonalíticos-granodioríticos intercalados com quartzitos anfíbolitos e rochas calciossilicáticas. A segunda unidade é o Rio Paraíba, o qual apresenta basicamente a mesma sequência litológica da Redenção da Serra, porém com maior contribuição das rochas calciossilicáticas e dos quartzitos. A última unidade da sequência é o Rio Una, composto por Xistos e quartzitos intercalados.

Com menor expressão na RMSP, mas com grande importância no contexto geológico do embasamento cristalino do Estado, se encontra o Complexo Pilar. Segundo Hasui *et al.* (1976) os supracitados complexos Pilar e Embu são unidades menores do Grupo Açungui e são diferenciados pelas respectivas assembleias litológicas.

Sobre o embasamento cristalino, se encontram os depósitos cenozoicos que compõe a Bacia de São Paulo. A bacia configurou-se como um hemigráben e possui direção ENE, com um basculamento para NNW e sua origem está diretamente ligada ao desenvolvimento do Sistema de Riftes da Serra do Mar, proposto por Almeida (1976). Em 1989, Riccomini renomeou este sistema que passou a ser chamado de Rifte Continental do Sudeste do Brasil (RCSB). O RCSB se formou ao longo do Paleógeno devido a reativação de sistemas de zonas de cisalhamento neoproterozoico e foi responsável pela geração de espaço de acomodação para os depósitos continentais colúvio-aluvionares que constituem a Bacia de São Paulo (Riccomini 1989, Riccomini *et al.* 2004).

A bacia possui espessura variada dependendo da região analisada, podendo conter poucos metros de pacote sedimentar em contato com o embasamento pré-cambriano ou em algumas áreas cerca de 250 m de sedimentos como descreve Bertolo (1996).

A estratigrafia da bacia de São Paulo é composta pelo Grupo Taubaté composto pelas formações Resende, Tremembé e São Paulo, pela Fm. Itaquaquecetuba e pelas coberturas Quaternárias.

Grupo Taubaté

A Formação Resende é composta por duas litofácies principais. A primeira consiste em depósitos de diamictitos e conglomerados com matriz pelítica a psamítica. Estes depósitos são atribuídos a leques aluviais proximais. A segunda litofácies é composta por lamitos arenosos intercalados com arenitos com estratificação cruzada e são atribuídos a um paleoambiente característico de uma planície aluvial (Riccomini e Coimbra, 1992).

A Formação Tremembé consiste em intercalações de materiais pelíticos esverdeados com argilas preta, ricas em matéria orgânica. As condições deposicionais sugerem um ambiente lacustre.

A Formação São Paulo caracteriza depósitos típicos de sistema fluvial meandrante, apresentando duas litofácies principais; a primeira consiste em arenitos conglomeráticos relacionados aos depósitos dos canais do sistema fluvial e a segunda consiste em lamitos típicos de planícies de inundação.

Formação Itaquaquecetuba

Os depósitos da Fm. Itaquaquecetuba remetem a um sistema fluvial entrelaçado e são descritas cinco (5) litofácies nesta unidade litoestratigráfica: conglomerados com arcabouço

arredondado, arenitos médios a grossos, arenitos finos a médios, maciços e mal selecionados, lamitos maciços e blocos subangulosos de rochas do embasamento (Riccomini e Coimbra, 1992). Sobre esta formação, alojam-se os depósitos Quaternários colúvio-aluviais compostos por sedimentos que gradam desde conglomerados basais até areias finas a médias.

3.2. Caracterização Hidrogeológica

No Estado de São Paulo há quatro tipos de aquíferos fraturados. O primeiro ocorre em rochas pré-cambrianas para e ortoderivadas com grau metamórfico variado e graníticas maciças ou foliadas. Este tipo de aquífero recebe o nome de Pré-Cambriano (p€) e é aflorante principalmente no leste do Estado. O segundo tipo denominado Pré-Cambriano Carbonático (p€c), ocorre na porção sul do Estado (Fernandes, 2007).

O terceiro tipo de aquífero fraturado, ocorre nas descontinuidades da fm. Serra Geral e, portanto, leva o nome de tal formação (Aquífero Serra Geral – Ksg). O quarto tipo de aquífero, denominado Aquífero Diabásio (Ksgd), aloja-se em rochas correlatas aos derrames basálticos que deram origem à fm. Serra Geral, ou seja, os diques e soleiras de ampla ocorrência ao longo do Estado, porém com maior importância na região sul de São Paulo (Fernandes, 2007).

De acordo com Hirata & Ferreira (2001), existem duas principais subdivisões quando se trata dos reservatórios de água subterrânea na RMSP: O Sistema Aquífero Sedimentar (SAS) que constituem as unidades sedimentares da Bacia de São Paulo e o Sistema Aquífero Cristalino (SAC) constituído pelas rochas pré-cambrianas do embasamento cristalino.

Os aquíferos presentes no SAS são livres a semi-confinados, de porosidade primária, heterogêneos e em geral apresentam baixa produtividade variando a vazão média dos poços entre 9 – 15 m³/h. Já os aquíferos presentes no SAC são mais heterogêneos e anisotrópicos por se tratarem de aquíferos fraturados, sendo assim, pois o transporte de água se dá em função da transmissividade de determinadas famílias de fraturas. As vazões médias nos poços localizados no SAC variam em torno de 7 – 9 m³/h (Hirata & Ferreira, 2001).

O sistema aquífero cristalino subdivide-se em duas unidades com características hidrogeológicas distintas. A primeira unidade encontra-se no manto de intemperismo das rochas, possui características heterogêneas, anisotrópicas e a circulação da água se pela porosidade intergranular, podendo atingir profundidades de aproximadamente 50 m. A segunda unidade diz

respeito às rochas cristalinas em si e a circulação das águas ocorre pela porosidade secundária (SABESP, 1994).

Em 2009, o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) publicou um relatório técnico denominado Projeto Jurubatuba no qual é apresentado um panorama geral da região, no que diz respeito a geologia e hidrogeologia regional, infraestrutura, riscos sociais e ambientais.

Motivados pela necessidade de aprimorar os conhecimentos acerca do aquífero cristalino sob a região do Jurubatuba e sua dinâmica de fluxo, alguns trabalhos foram desenvolvidos na região como no caso de L'Apicciarella (2009) que focou no reconhecimento e delimitação da contaminação por solventes organoclorados na região. Um dos principais produtos deste estudo foi a delimitação de três níveis diferentes de restrição para a utilização da água subterrânea (alta média e baixa restrição) de acordo com a susceptibilidade de cada área baseado na densidade de atividades com potencial de contaminação.

Fiume (2013) realizou um estudo do aquífero em escala regional. Os dados foram coletados por meio de ensaios geofísicos e levantamentos de campo em afloramentos. Tais dados serviram como base para a elaboração de um modelo conceitual para o aquífero cristalino. Barbosa (2015) fez uso de ferramentas do Sistema de Informações Geográficas (SIG) para a compilação de dados referentes às áreas contaminadas na região.

3.3. Fundamentos Teóricos

O aquífero estudado ocorre nas discontinuidades presentes em rochas cristalinas, razão pela qual é classificado como aquífero fraturado. Sendo assim, neste tipo de aquífero, três parâmetros básicos são necessários para modelar o fluxo hidráulico: densidade, abertura e conectividade das fraturas (Domenico & Schwartz, 1990). A determinação dos parâmetros é uma tarefa complexa devido à heterogeneidade deste tipo de formação. O estudo dos aquíferos fraturados pode ser feito de maneira a individualizar cada fratura, agrupá-las ou estabelecer um paralelo com um meio poroso que tenha um comportamento semelhante. A escolha é feita de acordo com o caso em estudo.

Outro parâmetro essencial para a modelagem matemática é o fluxo em determinado grupo de fraturas. Ciente disso, Snow (1968 *apud* Freeze & Cherry, 1979) realizou experimentos de laboratório e de campo demonstrando que a condutividade hidráulica é proporcional ao cubo

da abertura, a equação resultante destes ensaios ficou conhecida como lei cúbica (Equação 1). A condutividade hidráulica é um parâmetro obtido em campo.

$$K = \frac{\rho g}{12\mu} * Nb^3 \quad (\text{Equação 1})$$

K= Condutividade hidráulica

ρ = Densidade da água

g= Aceleração gravitacional

μ = Viscosidade da água

b= abertura da fratura

N= número de fraturas

Com base na equação que define a Lei Cúbica, é possível constatar que a abertura das fraturas (b) possui maior influência do que o número de fraturas interceptadas para a determinação da condutividade hidráulica. Gale e Rouleau (1983) indicam, através de dados, que a produtividade dos poços é relativamente independente do número de fraturas interceptadas pelo furo.

Em 2015, o Comitê de Geologia e Engenharia Geotécnica (*Committee on Geological and Geotechnical Engineering*) do *The National Academies of Sciences, Engineering and Medicine* dos Estados Unidos, publicou uma síntese acerca dos conhecimentos de investigação, avaliação e remediação em aquíferos fraturados. Neste estudo estão listados fatores que condicionam a transmissividade em aquíferos fraturados: A abertura e a rugosidade da fratura, a intensidade e extensão do fraturamento e o preenchimento das descontinuidades (NAP, 2015).

3.4. Métodos de investigação e suas aplicações

As técnicas de imageamento acústico (*Acoustic Televiewer - ATV*) foram desenvolvidas inicialmente na década de 60 pela indústria do petróleo, porém somente no início da década de 1990 que este método passou a ser aplicado para investigações hidrogeológicas. O desenvolvimento deste tipo de estudo deve-se em grande parte a trabalhos pioneiros como Paillet et al. (1990) e (1995) onde os autores fazem uma síntese dos estudos acerca dos métodos de imageamento acústico, bem como a aplicação destes na investigação de poços de água subterrânea. As sondas utilizadas para a obtenção da perfilagem contam com um sistema de orientação que consiste em um acelerômetro e um magnetômetro triaxial. Este conjunto permite a obtenção de imagens contínuas do poço, e suas respectivas estruturas orientadas (Williams & Johnson 2004).

A perfilagem de calibre pode ser obtida através dos resultados da perfilagem ATV, uma vez que, também utiliza o princípio de trânsito de onda acústica refletida. O procedimento visa caracterizar as variações da morfologia da superfície das paredes do poço, pela identificação de rugosidades, zonas com maior fraturamento e zonas defeituosas devido a erros técnicos durante a instalação do poço (Ribeiro, 2012)

O imageamento ótico (*Optical Televiewer* – OTV) foi desenvolvido na década de 80 e passou a ser utilizado nos estudos de água subterrânea nos anos 2000 (Williams & Johnson 2004). Este método proporciona o imageamento contínuo e em 360° do poço, sendo utilizado para a distinção das litologias presentes, presença de fraturas preenchidas ou abertas e feições de alteração na rocha (Williams & Johnson 2004). A sonda é dotada de um leitor formado por um conjunto de prismas, os quais proporcionam uma abertura de 360° para o imageamento completo de cada trecho. Contudo, a qualidade da filmagem é condicionada pela turbidez da água e a presença de sujeira na parede do poço, o que pode comprometer os resultados (Williams & Johnson 2004). Adicionalmente, a resolução da filmagem se dá em função da velocidade de deslocamento ou perfilagem da câmera no interior do poço.

A perfilagem de gama é feita com a utilização de um detector Geiger-Mueller, aparelho que mede radiações ionizantes convertendo em pulsos elétricos com a finalidade de quantificar a radiação emitida. Desta forma, é possível medir as variações de radiação emitidas ao longo dos estratos seccionados pelo poço. Tais variações de irradiação ocorrem em função da presença de minerais com concentrações de isótopos radioativos (^{40}K , ^{235}U , ^{238}U e ^{232}Th) como feldspatos, argilominerais e micas. Em síntese, a perfilagem de irradiação gama auxilia a distinção litológica de acordo com a composição destas (Johnson, 2012).

O levantamento de dados de fluxo da água subterrânea bem como seu sentido de deslocamento vertical dentro do poço, são adquiridos através de um medidor de fluxo (*flowmeter*). O uso dos medidores de fluxo permite a aquisição de dados acerca das possíveis entradas e saídas de água no poço e também quantificar as vazões de determinadas zonas de interesse (Ribeiro, 2012).

Segundo Johnson *et al.* (2002) após a identificação de uma zona de interesse, deve-se realizar ao menos duas leituras sendo uma acima do referido trecho e outra abaixo deste de forma a confirmar o sentido do fluxo de água. Adicionalmente, os autores descrevem a importância de realizar as medições sob duas condições: Fluxo natural do poço e sob estresse hídrico, proporcionado pelo bombeamento em baixa vazão. Tal procedimento é padrão em

aquíferos fraturados, uma vez que, variações de comportamento hidráulico neste sistema, podem gerar alterações em sua dinâmica de modo a ativar fraturas que sob condições normais apresentavam fluxo nulo.

Existem diversos tipos de *flowmeter*, porém o escolhido foi de pulso de calor (*Heat Pulse Flowmeter*). Este tipo de medidor consiste em uma resistência térmica a qual é responsável pela emissão de pulsos de calor. São posicionados dois sensores, um acima e outro abaixo da resistência, estes sensores captam os pulsos de calor emitidos pela resistência. As leituras são registradas em função do tempo e o gráfico resultante proporciona a informação da velocidade e do sentido do fluxo. Para a interpretação do sentido do fluxo, é necessário verificar a inflexão da curva (Figura 2), podendo ser uma inflexão positiva (ascendente) ou negativa (descendente).

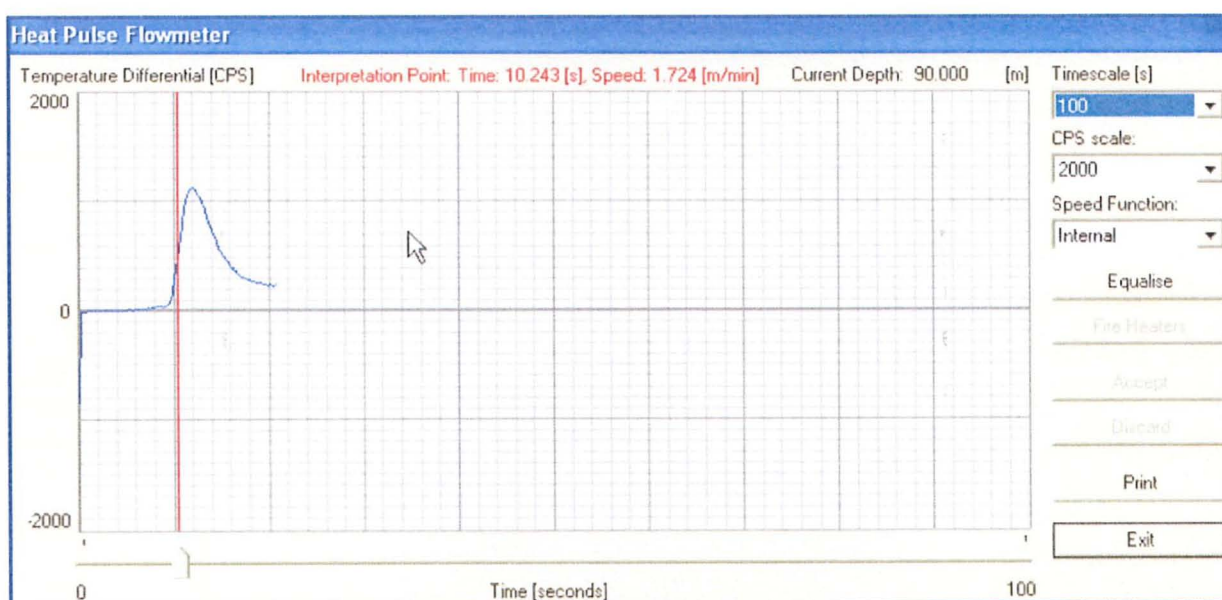


Figura 2. Exemplo de gráfico com inflexão positiva (fluxo ascendente). Nos eixos: *Temperature Differential* (Gradiente Térmico). Unidade de leitura: CPS – *counts per second*. *Time* (Tempo). Unidade de leitura: Segundos. Retirado de Ribeiro, 2012

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente foi feito um levantamento bibliográfico sobre as técnicas de investigação aplicadas em aquíferos fraturados bem como os trabalhos já realizados na área de interesse. As técnicas aplicadas neste trabalho foram: perfilagens ótica (OTV), acústica (ATV), calibre, irradiação gama natural e o levantamento de dados de fluxo (flowmeter). As quatro primeiras técnicas se enquadram na categoria “perfis geofísicos” da Figura 3. Essa metodologia foi

desenvolvida inicialmente na Universidade de Guelph para a investigação em aquíferos fraturados em rochas sedimentares. Contudo seu passo-a-passo pode ser utilizado nos aquíferos fraturados presentes em rochas cristalinas também. Atualmente, esse conjunto de técnicas é conhecido como *Discrete Fracture Network Approach* – DFN (Parker, 2011).

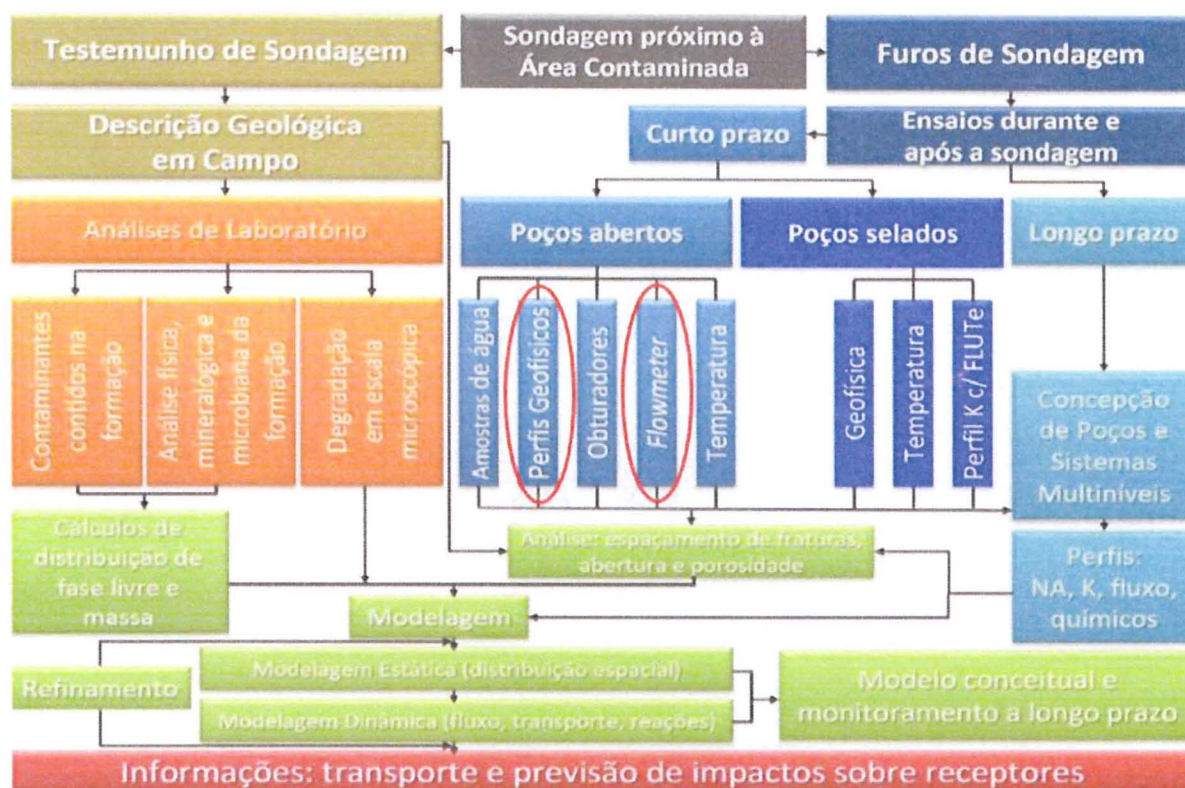


Figura 3. Fluxograma com as técnicas aplicadas na metodologia do *Discrete Fracture Network Approach* – DFN. As técnicas destacadas são as utilizadas no presente trabalho. (Adaptado de Parker 2011).

As técnicas selecionadas foram aplicadas em três antigos poços de produção de água subterrânea (255, 256 e 1204) instalados no shopping SP Market. A atividade de campo para a aplicação dos métodos de investigação se deu no período de 20 de abril a 8 de maio de 2017.



Figura 4: Fotos do trabalho de campo (poço 1204).

4.1. Filmagem do poço

O equipamento utilizado foi o *R-Cam XLT Color Video Water Well Inspection System* produzido pela Laval Underground Surveys (Figura 5 A) e é dotado de duas câmeras com lentes de ampla abertura acopladas. A sonda ainda conta com pares de *Light Emitting Diodes (LEDs)* para iluminar o poço. Acoplado à sonda se encontra o mini guincho que, por sua vez, é conectado com o controlador que possui uma tela LCD 9" para o monitoramento em tempo real da filmagem do poço. O conjunto é provido de uma bateria 12 VDC a qual fornece energia para o sistema inteiro.

A filmagem foi o primeiro procedimento aplicado nos três poços, pois permite uma análise inicial das estruturas em tempo real. O imageamento foi feito no sentido descendente com velocidade controlada, a fim de garantir uma boa resolução para imagem. Ao longo da manobra foi realizado um monitoramento contínuo da filmagem e à medida que se detectava algum trecho

de interesse, era acionado um mecanismo para alterar a câmera de forma a focar no respectivo trecho, possibilitando uma análise em maior detalhe da parede do poço (Figura 5 B e C).

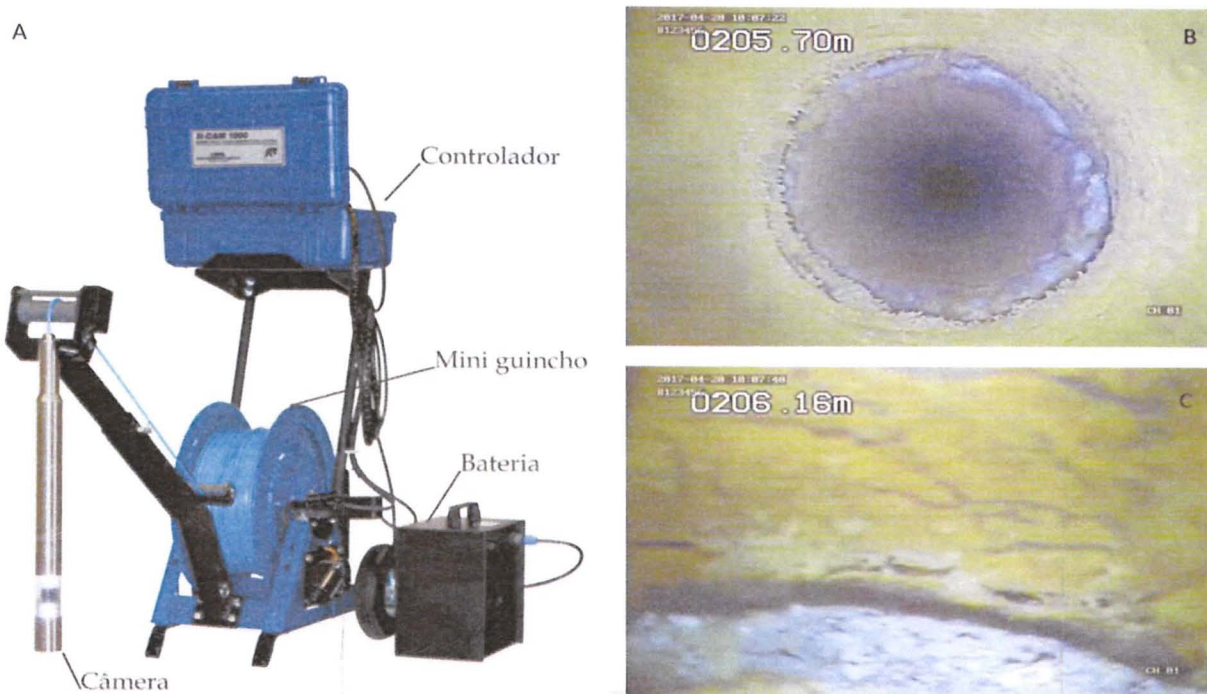


Figura 5. A. Equipamento utilizado para a filmagem do poço (R-Cam XLT Color Video Water Well Inspection System). Adaptado do Manual operacional do equipamento, fornecido por Laval *Underground Surveys*. B. Trecho de interesse identificado no poço 1204. C. Filmagem em detalhe da parede do poço no trecho de interesse da imagem 4.B.

4.2. Perfilagem acústica, gama e caliper

O imageamento acústico foi realizado com a sonda QL40 ABI (2G) *Acoustical Borehole Imager* fabricado pela Mount Sopris *Instruments*. O fabricante ainda fornece o software para aquisição dos dados bem como o datalogger responsável pela leitura e transmissão dos dados para o computador.

As perfilagens acústica e gama foram executadas simultaneamente, uma vez que, o equipamento permite o acoplamento das duas sondas. Tal procedimento foi adotado para otimizar o tempo durante os ensaios de forma a obter todas as leituras utilizando apenas uma única manobra em cada poço.

4.3. Perfilagem de fluxo de água subterrânea

O medidor de fluxo utilizado foi o HFP-2293 *Heat Pulse Flowmeter* também fabricado pela Mount Sopris *Instruments* (Figura 6A). A sonda ainda é equipada com *diverters* (Figura 6B), discos de borracha que encaixam na sonda e possuem a finalidade de bloquear o fluxo de água no espaço entre a sonda e a parede do poço. Desta forma, o fluxo medido dentro do equipamento, representará o fluxo do poço naquele trecho específico.

A medição de fluxo foi o último método de investigação aplicado durante a etapa de campo. Os trechos selecionados para realizar as medições foram predeterminados com base no imageamento ótico e acústico combinados, os quais exibem trechos com maior concentração de descontinuidades dentro do poço. Além da medição sob condições normais (sem bombeamento), foi feita uma segunda perfilagem com bombeamento a fim de registrar as mudanças na dinâmica do poço.

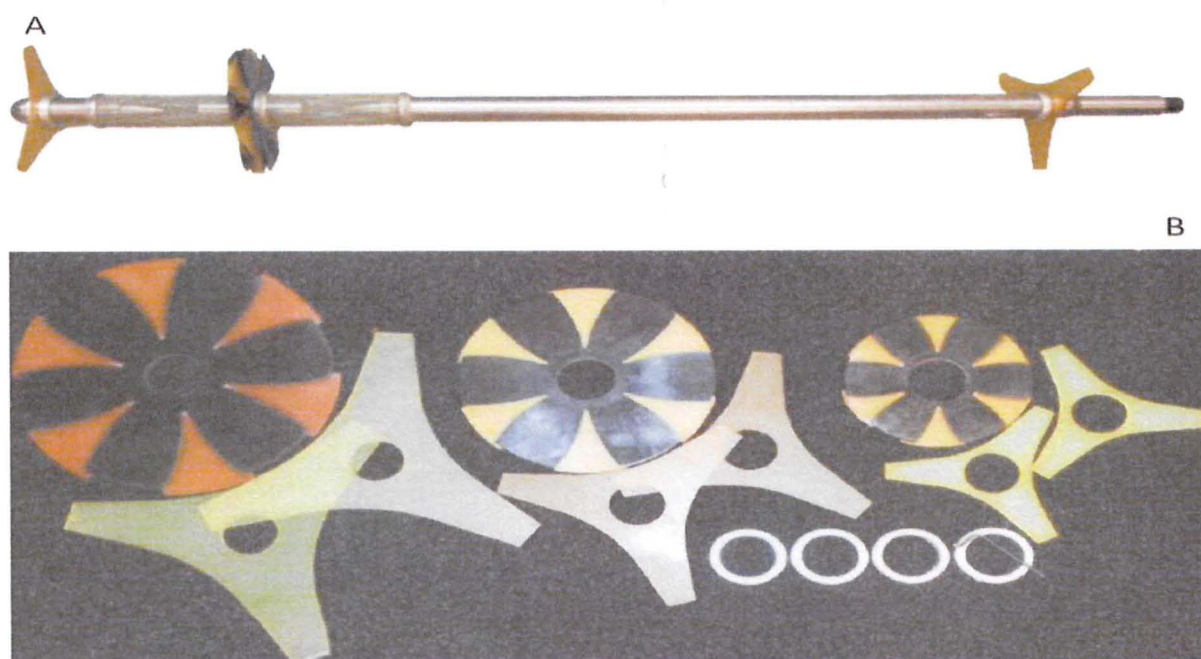


Figura 6. A. Sonda *flowmeter* montada para realizar os ensaios de medição de fluxo. B. *Diverters* em detalhe.

Os dados brutos obtidos através dos ensaios de campo possuem o formato de arquivo de texto .txt. Foi realizada a importação destes dados para uma planilha *Excel*, a fim de aplicar um tratamento estatístico, pois em cada trecho, ao menos três medidas foram coletadas. Após o tratamento, inicia-se a fase de interpretação dos dados com base na planilha elaborada pelo

United States Geological Service (USGS) denominada FLASH (Flow-Log Analysis of Single Holes).

A planilha, consiste em um documento *Excel* disponível no site da USGS (Figura 7) e é editável para o estabelecimento de certos parâmetros de entrada (*inputs*). Juntamente com a planilha, é possível realizar o *download* do artigo que descreve a metodologia utilizada por Day-Lewis *et. al.* (2011).

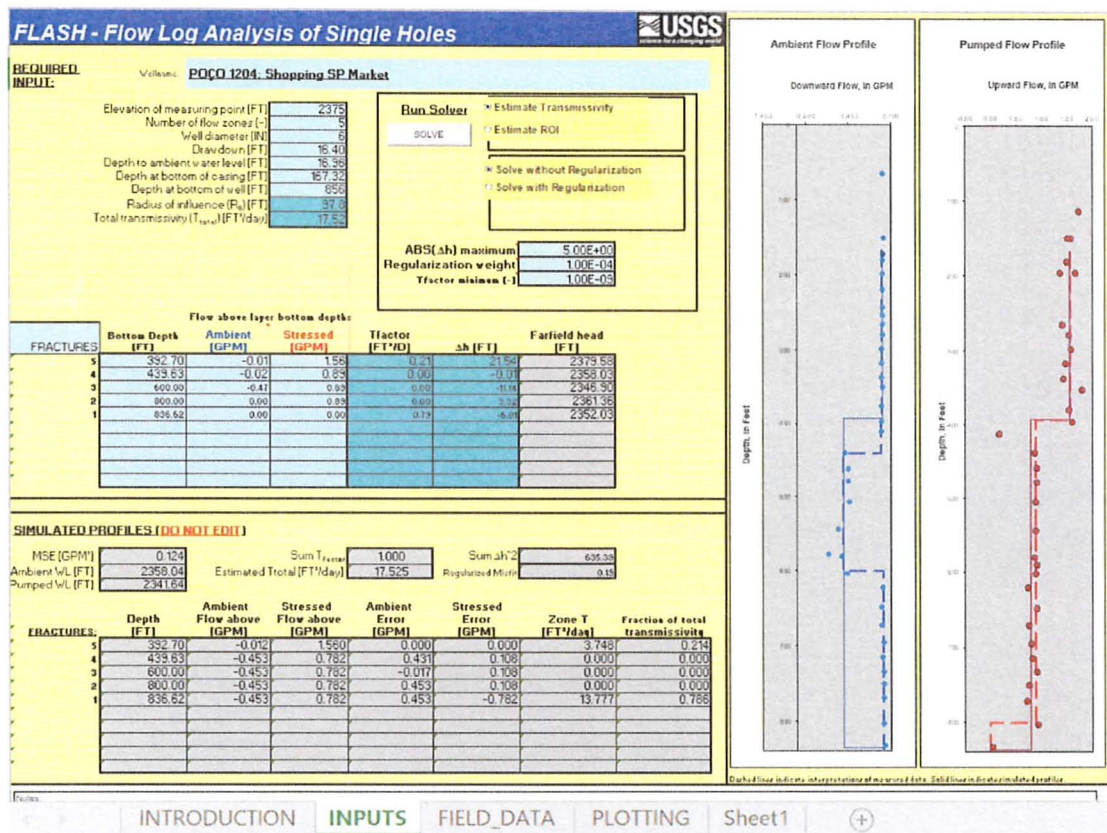


Figura 7. Layout da planilha FLASH com dados do poço 1204 como exemplo.

O *software* necessita de alguns valores para determinados parâmetros de entrada que devem ser preenchidos na aba "Input" tais como: *Elevation of measuring point* (cota topográfica), *well diameter* (diâmetro do poço), *Drawdown* (rebaixamento do NA) durante o ensaio de bombeamento, *depth to water level* (nível d'água), *depth at bottom of well* (profundidade do poço), *n of flow zones* (número de zonas de fluxo), *radius of influence* (raio de influência), *depth of bottom casing* (profundidade do revestimento) e *total transmissivity* (transmissividade total). A planilha ainda permite simular os resultados de transmissividade total ou do raio de influência. Para o seguinte estudo, estabeleceu-se um raio de influência de 30 m para simular os resultados de transmissividade total.

Definido o número de zonas de fluxo, é preciso delimitá-las e transcrever os respectivos valores de fluxo para os ensaios com e sem bombeamento. O último passo foi copiar os dados de perfilagem de fluxo, previamente tratados, para a aba "*Field_data*". É preciso atentar ao fato de que os valores aceitos pela planilha são baseados nas unidades norte-americanas e não no Sistema Internacional (SI).

4.4. Wellcad

As perfilagens realizadas ao longo da etapa de campo foram tratadas com o *software* Wellcad. O programa de computador possui ferramentas de tratamento da imagem, quanto a sua nitidez, brilho e correção de pequenas incongruências devido a erros durante a perfilagem.

Para iniciar o tratamento dos dados é preciso carregar o arquivo ".HED" na área de trabalho do programa. Uma vez carregado o arquivo, inicia-se a fase de ajustes de azimute, de declinação do norte magnético em relação ao norte geográfico. Após os devidos ajustes, estabeleceu-se padrões para que o programa fizesse uma busca pelas estruturas presentes no log. A identificação das descontinuidades é feita de maneira automática, porém é necessário um tratamento manual acerca do grau de confiabilidade da detecção das estruturas. Em seguida, é feita a classificação (Figura 8) das estruturas identificadas baseado nos seguintes tipos: Zona fraturada/indiferenciada (*Broken zone/Undifferentiated*); Fratura com maior abertura (*Major open joint/Fracture*) – abertura aparente maior que um centímetro (>1 cm); Fratura com menor abertura (*Minor open joint/Fracture*) - abertura aparente menor que um centímetro (<1 cm); Fratura parcialmente aberta (*Partially open joint/Fracture*); Fratura preenchida (*Filled fracture*); Bandamento/Foliação (*Banding/Foliation*).

A classificação das estruturas foi feita com base nos seguintes critérios; Abertura, preenchimento, ângulo de mergulho e continuidade das fraturas. As nomenclaturas utilizadas para classificação foram retiradas da biblioteca de estruturas presente no banco de dados do Wellcad:

Dictionary: Fracture Ranking

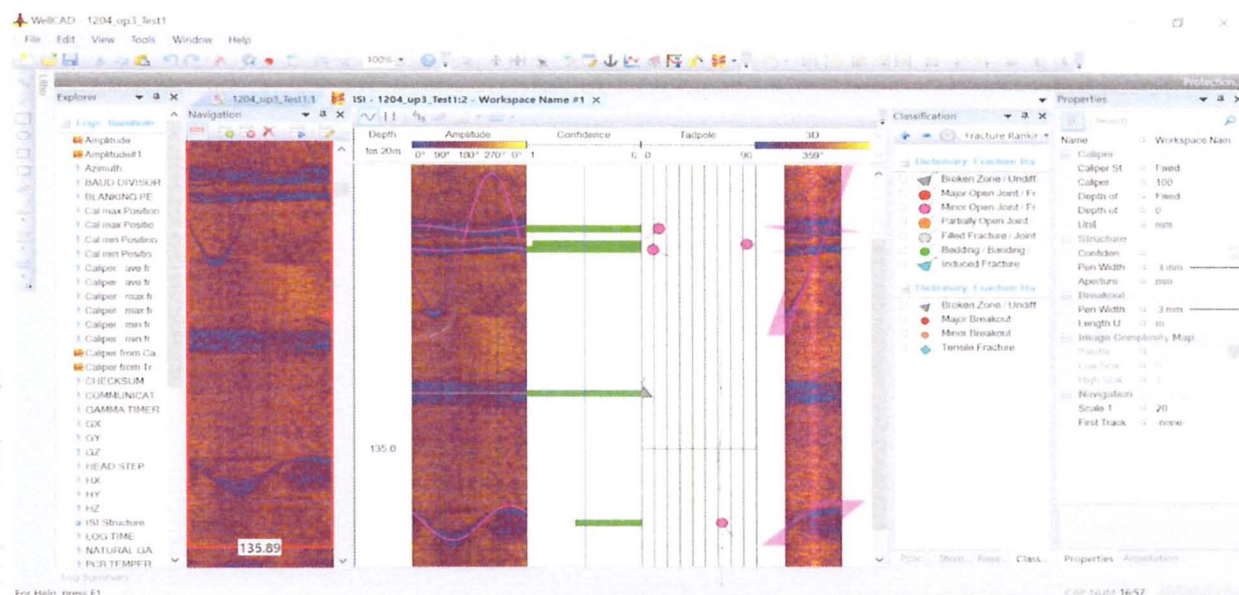


Figura 8. Identificação e classificação de fraturas com a utilização do programa Wellcad. Trecho do poço 1204.

O programa ainda possui a função de plotar a orientação das respectivas fraturas identificadas em um estereograma (Figura 9) tornando possível a avaliação estrutural e dos padrões de fraturamento que interceptam os poços.

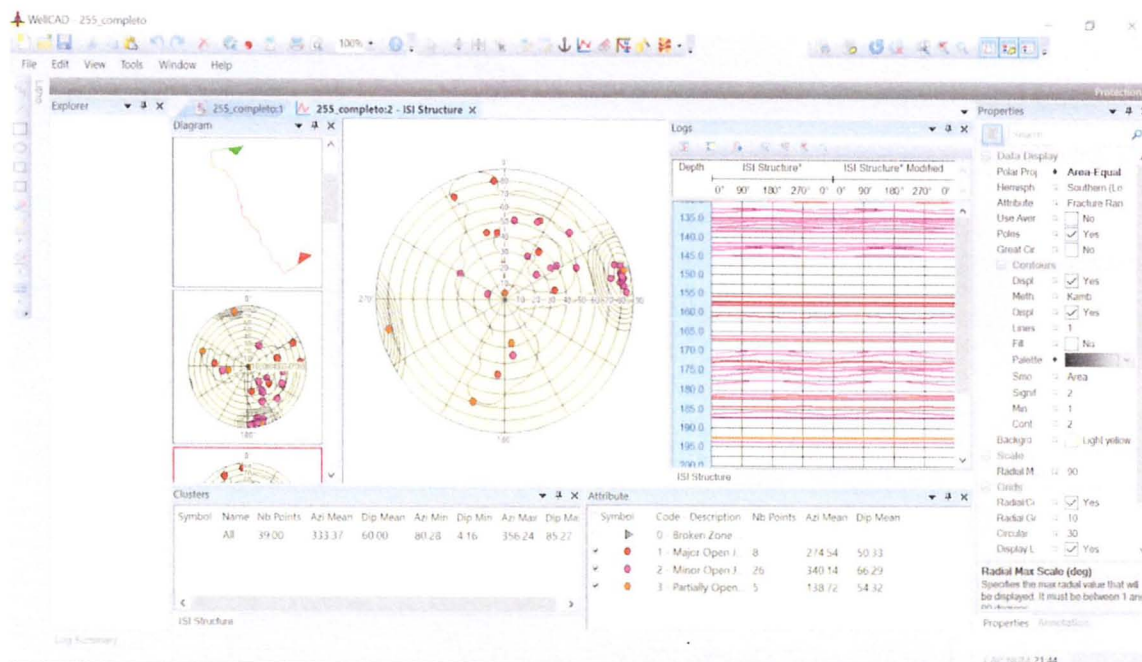


Figura 9. Projeções em estereograma das fraturas identificadas com a utilização do Wellcad. Estruturas referentes ao poço 255.

Os dados obtidos com o *flowmeter* foram importados para o Wellcad em forma de “*mudlog*”, ferramenta que permite verificar como ocorrem as variações de vazão ao longo do perfil do poço de acordo com a profundidade. Os dados de *input* são os mesmos utilizados na planilha FLASH, o que permite estabelecer um comparativo entre o *output* do Wellcad com o produto da planilha da USGS. Para realizar a importação dos dados de fluxo é necessário convertê-los em .txt.

5. RESULTADOS

Os resultados são apresentados para cada poço estudado e estão estruturados da seguinte maneira: 1 - Fotos de estruturas relevantes identificadas segundo a respectiva profundidade. 2 – Resultados da análise estrutural (azimute e mergulho). 3 – *Log-flow* obtido através do *software* FLASH.

Os dados das perfilagens geofísicas foram interpretados com a utilização da ferramenta *tadpole* disponível no *software* Wellcad. Esta ferramenta consiste em um perfil representativo das diversas estruturas com suas respectivas orientações (direção/mergulho). Em associação as perfilagens geofísicas, utilizou-se as filmagens a fim de auxiliar na identificação das fraturas interceptadas pelos poços. Nesta seção, são apresentados os perfis condensados dos poços e algumas fotos de fraturas em trechos pontuais. As filmagens e os *logs* completos são

apresentados nos anexos A e B, respectivamente. Ainda com a utilização do Wellcad, foram gerados os diagramas Schimidt-Lambert e em roseta a partir da identificação das descontinuidades.

Os resultados de *log-flow* foram obtidos a partir do tratamento dos dados de fluxo aplicados a planilha FLASH (USGS) e exibem os perfis dos ensaios em condições ambiente (linha azul) e com bombeamento (linha vermelha). Os valores de fluxo positivos indicam fluxo ascendente enquanto que os valores negativos indicam fluxo descendente. A planilha gera os gráficos dos ensaios com os resultados das medições de campo (Linha grossa e tracejada) juntamente com uma linha contínua e fina que simula os resultados com base nos dados de *input*. Em suma, o gráfico gerado estabelece um comparativo entre: Dados de campo e Simulado.

De forma complementar, utilizou-se o Wellcad para a comparação dos *outputs* (perfis de fluxo) de ambos os *softwares*.

- Resultados obtidos do poço 255

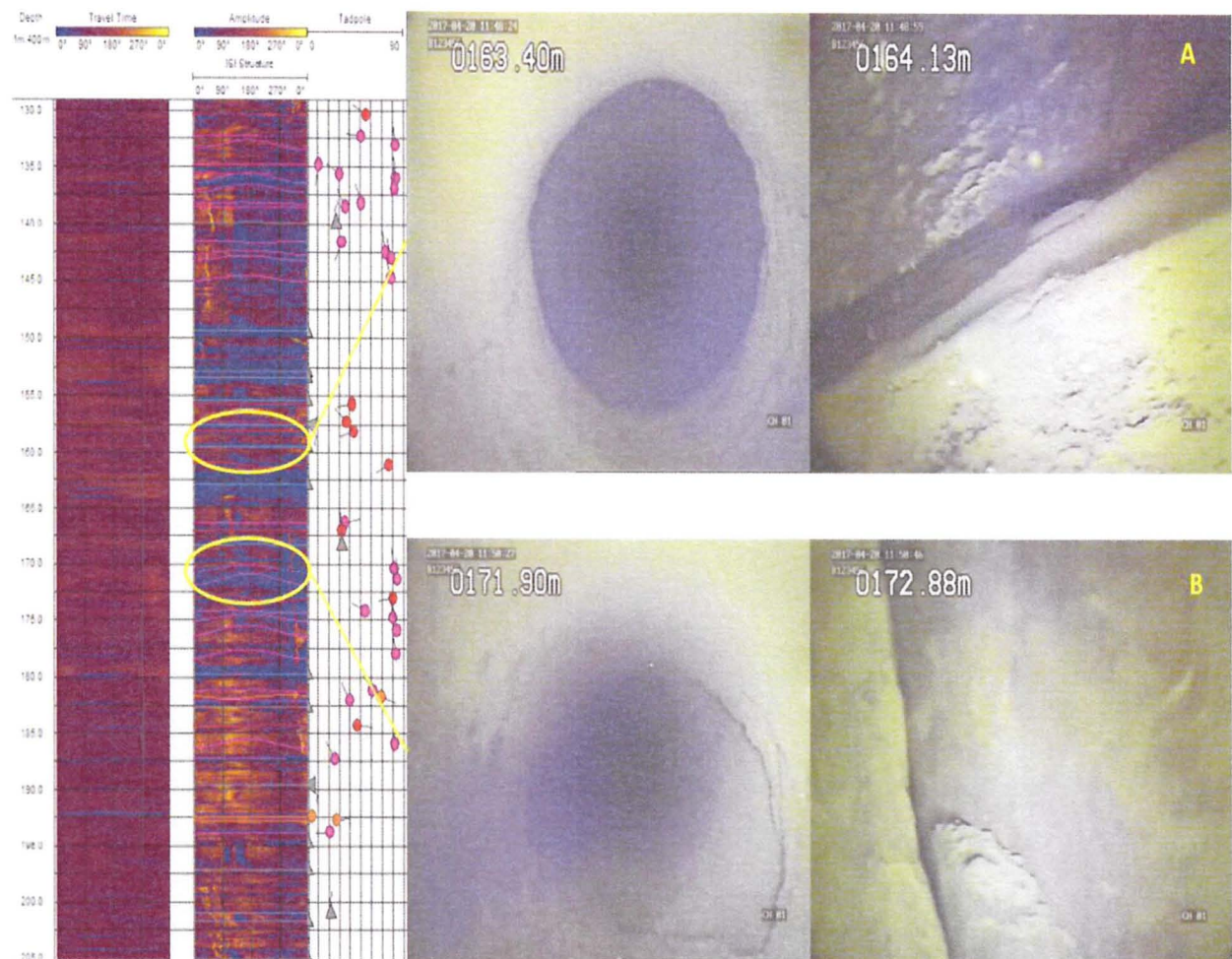


Figura 10. Trecho do log do poço 255. Em destaque dois trechos. **A.** Zona com fratura de maior abertura (*Major open fracture*) – Filmagem normal (foto da esquerda) e fratura em detalhe (foto da direita). **B.** Zona com fratura de menor abertura (*Minor open fracture*) com acentuado ângulo de mergulho - Filmagem normal (foto da esquerda) e fratura em detalhe (foto da direita).

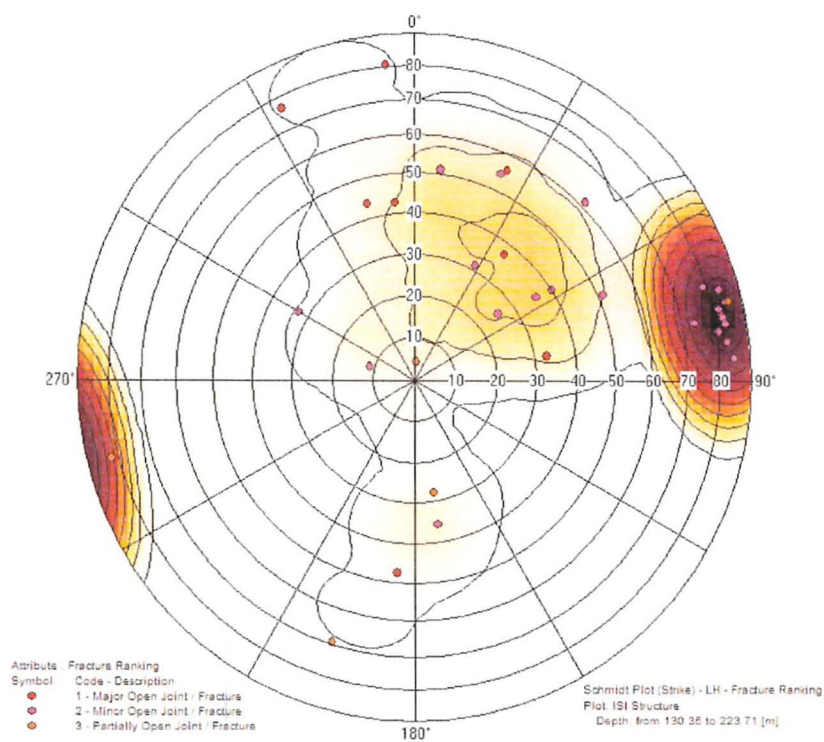


Figura 11. Projeções polares dos azimutes em diagrama de Schmidt-Lambert (*South Hemisphere*). Poço 255.

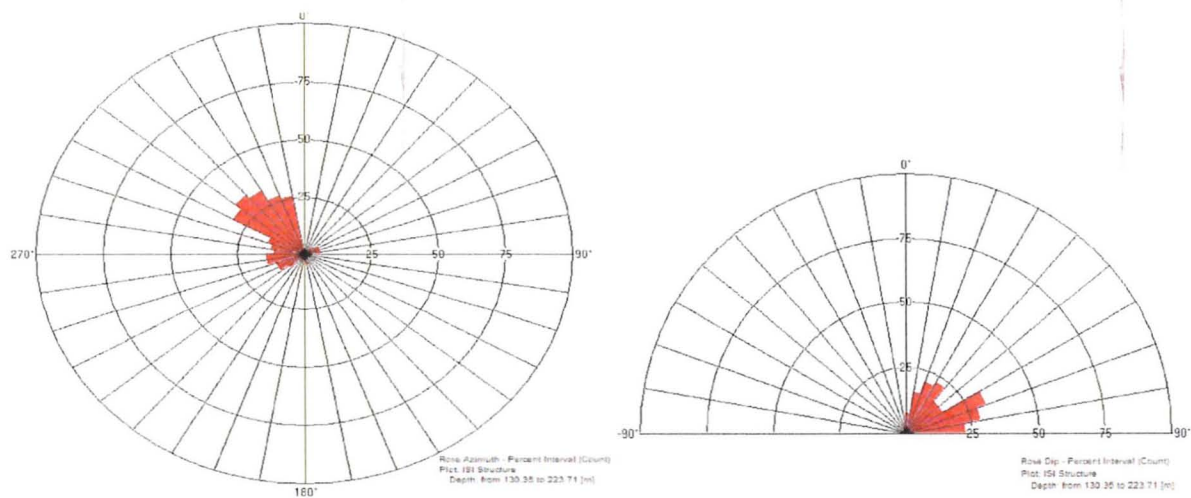


Figura 12. Diagramas em roseta. Azimute (à esquerda) e Mergulho (à direita). Poço 255.

O valor de transmissividade total simulado pela planilha FLASH com um raio de influência de 30 m foi de 10,97 ft²/day (1,02 m²/dia) e o perfil de fluxo completo é apresentado no Gráfico 1.

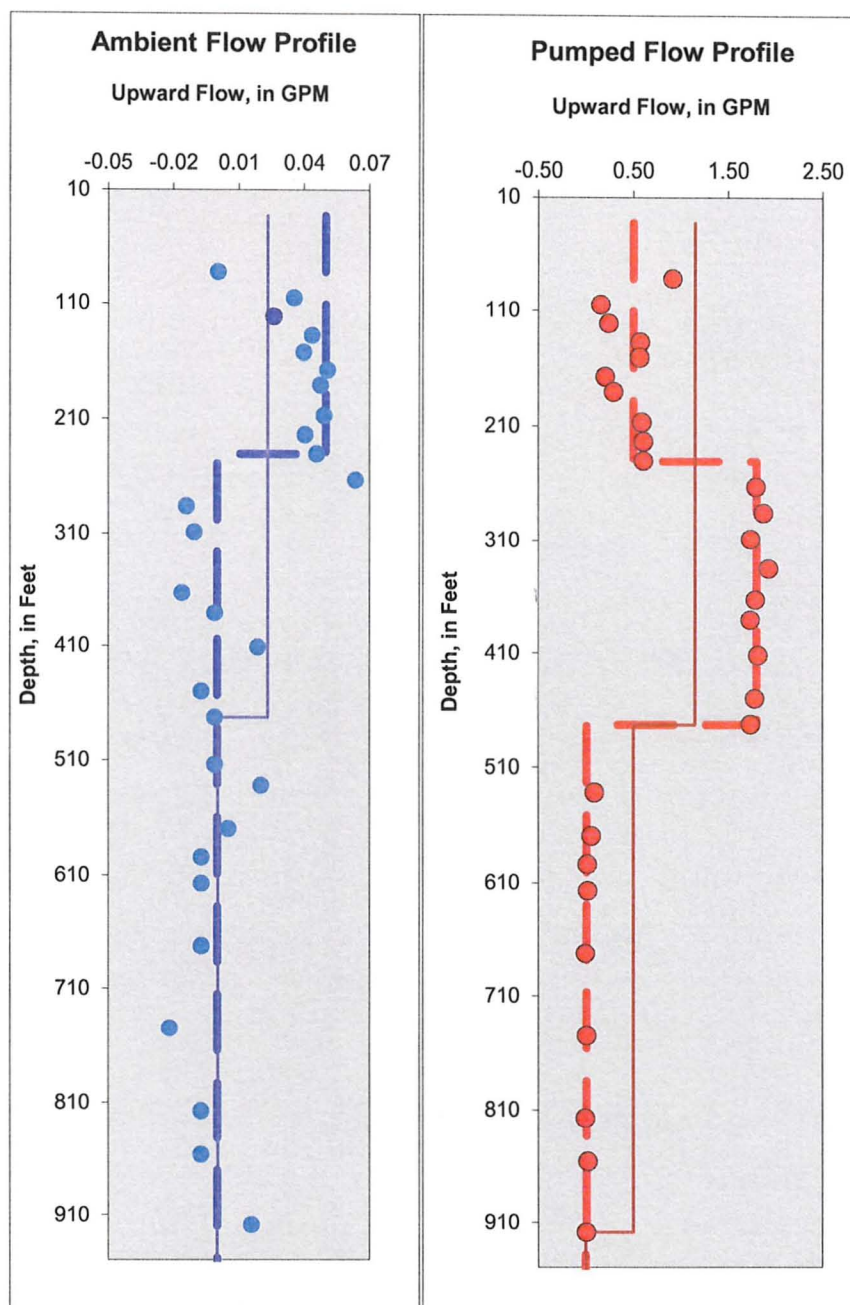


Gráfico 1: Log-flow (FLASH) do poço 255.

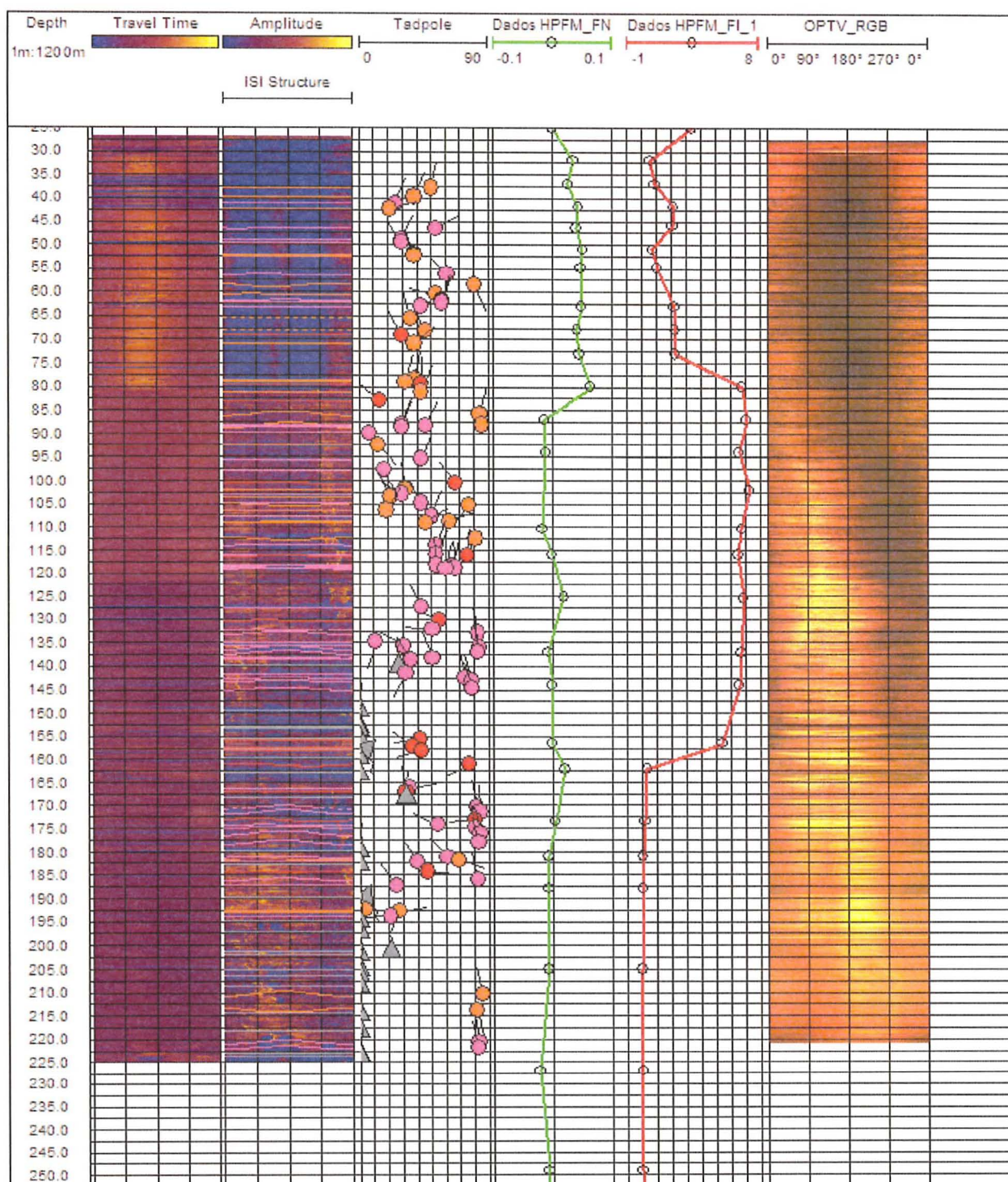


Figura 13: Perfis acústico, *tadpole*, fluxo (condições ambiente e com bombeamento) e filmagem. Poço 255.

- Resultados obtidos do poço 256

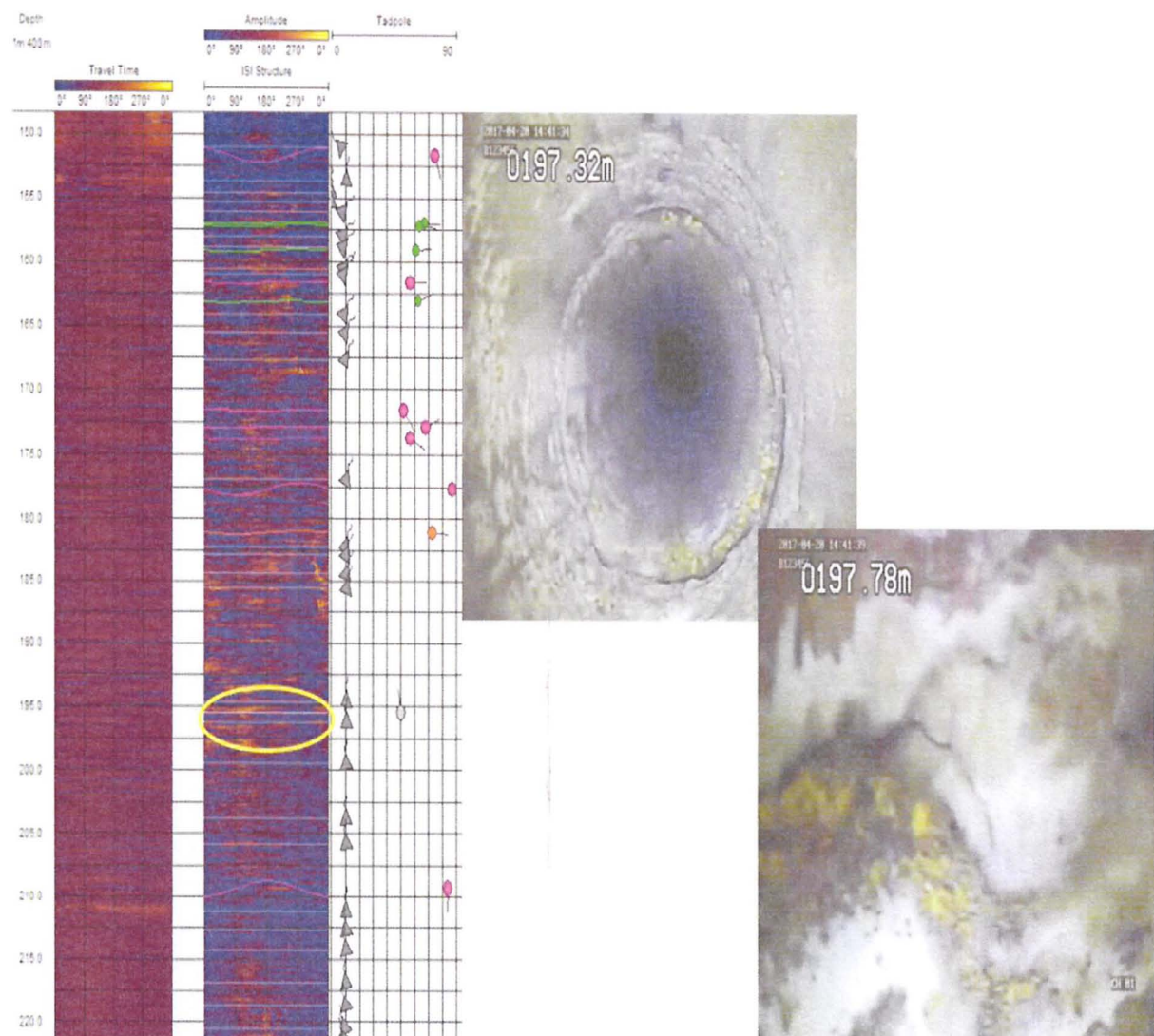


Figura 14. Trecho do log do poço 256. Em destaque trecho com fratura preenchida. Detalhe do preenchimento da fratura (foto da direita).

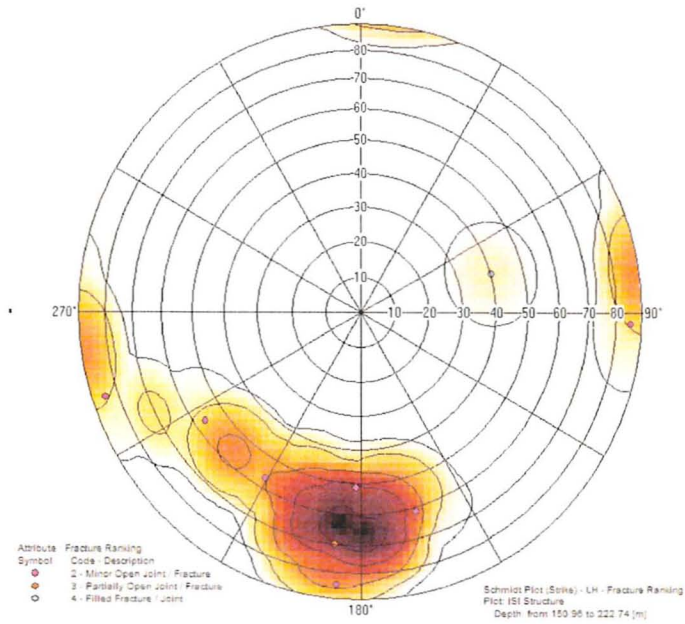


Figura 15. Projeções polares dos azimutes em diagrama de Schmidt-Lambert (*South Hemisphere*). Poço 256.

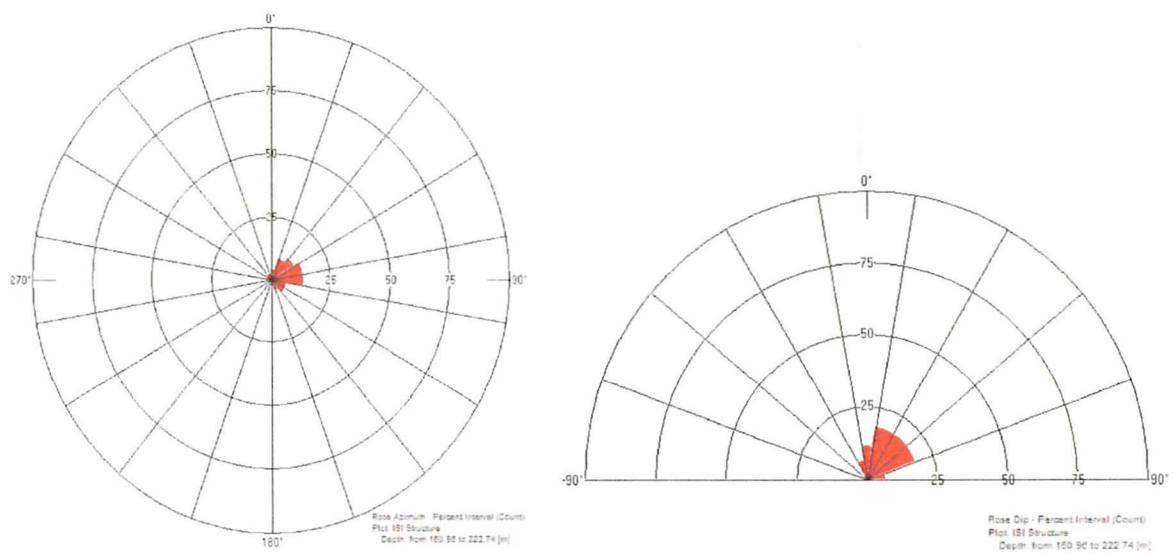


Figura 16. Diagramas em roseta. Azimute (à esquerda) e Mergulho (à direita). Poço 256.

O valor de transmissividade total simulado pela planilha FLASH com um raio de influência de 30 m foi de 9,86 ft²/day (0,91 m²/dia) e o perfil de fluxo completo é apresentado no Gráfico 2.

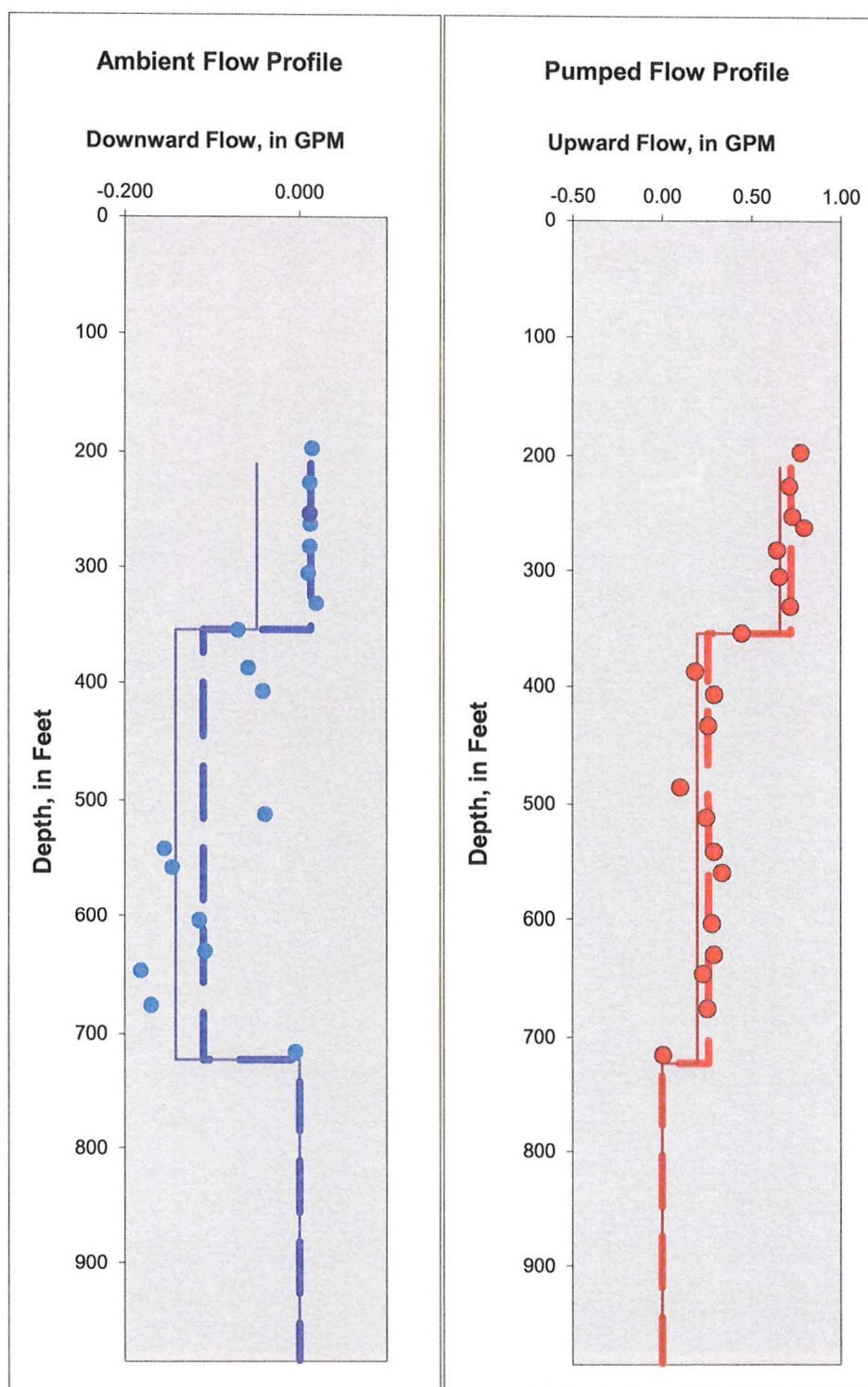


Gráfico 2: Log-flow (FLASH) do poço 256.

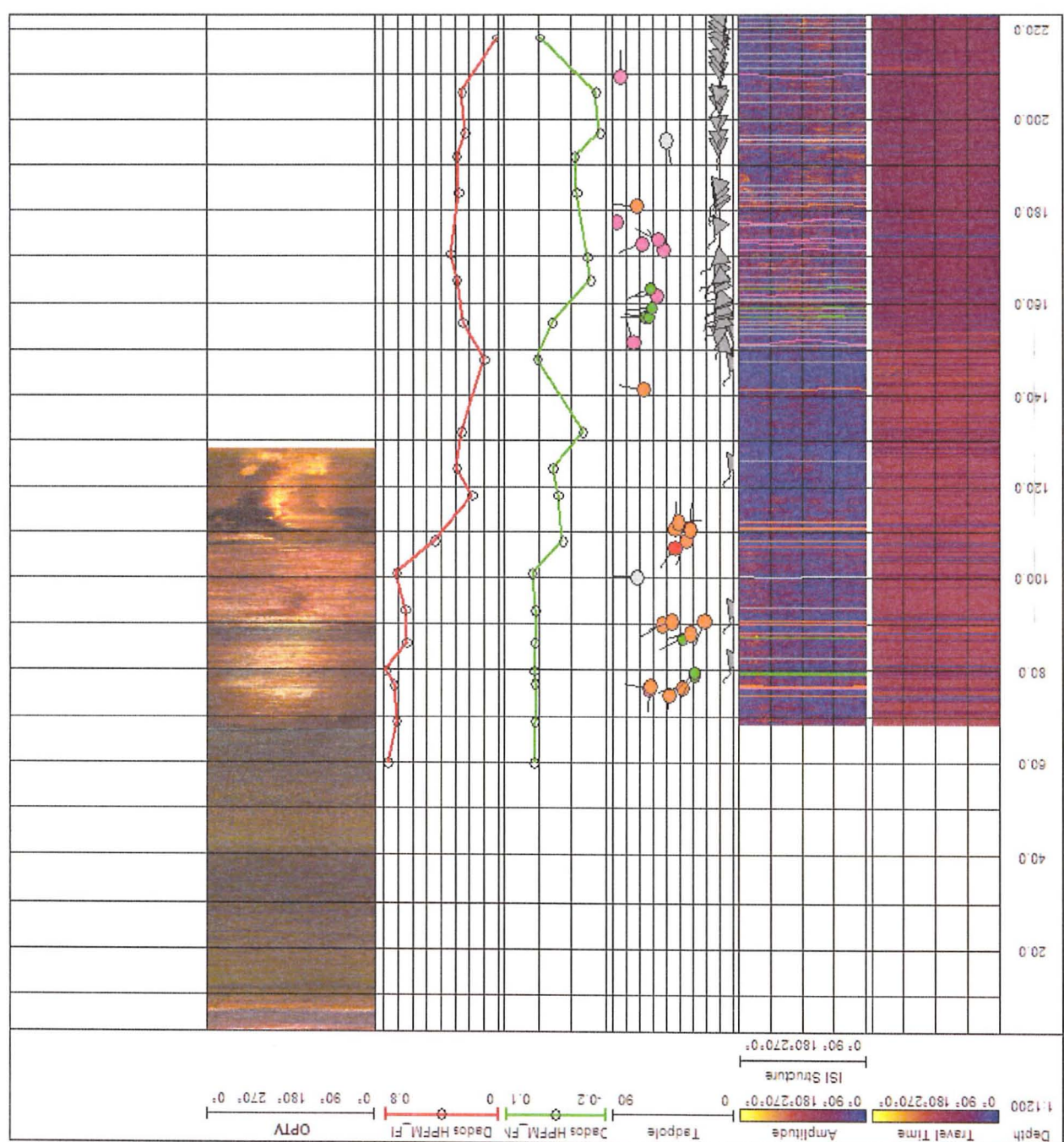


Figura 17: Perfis acústico, *tadpole*, fluxo (condições ambiente e com bombeamento) e filmagem. Poço 256.

- Resultados obtidos do poço 1204

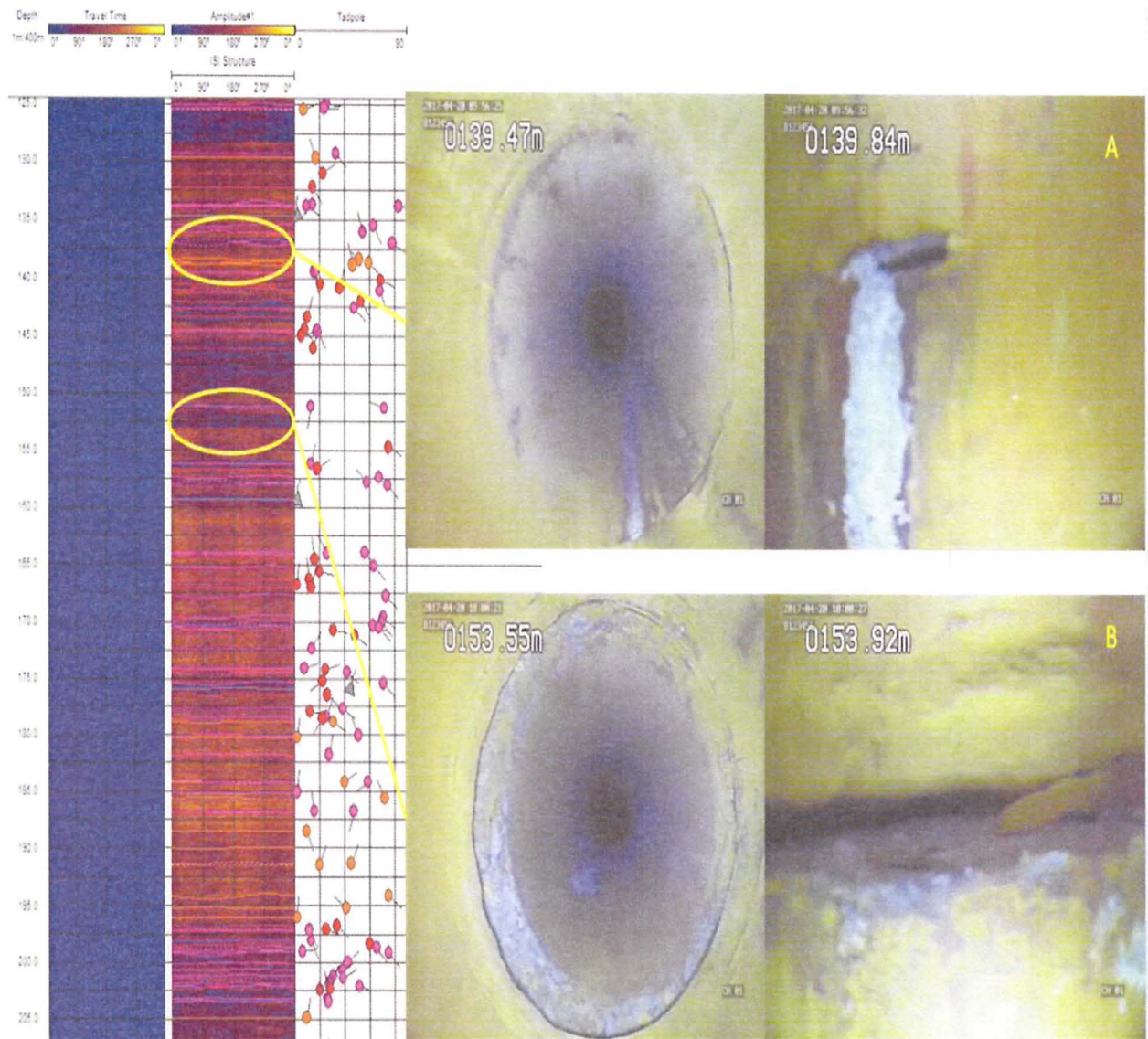


Figura 18. Trecho do log do poço 1204. Em destaque dois trechos. **A.** Zona com fratura parcialmente aberta – Filmagem normal (foto da esquerda) e fratura em detalhe (foto da direita). Esta fratura apresenta um escoamento esbranquiçado na parede do poço. **B.** Zona com fratura de maior abertura (*Major open fracture*) – Filmagem normal (foto da esquerda) e fratura em detalhe (foto da direita). Ambas as estruturas apresentam mergulho sub-horizontal.

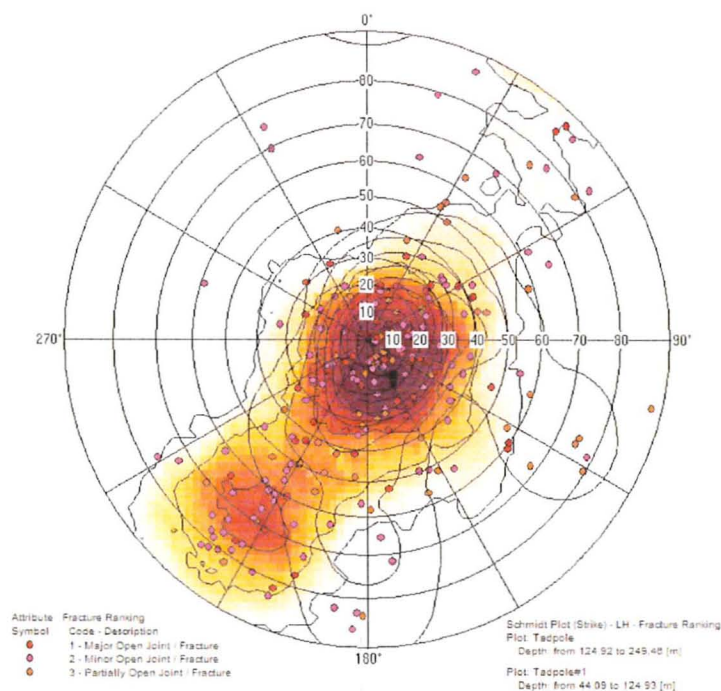


Figura 19. Projeções polares dos azimutes em diagrama de Schmidt-Lambert (*South Hemisphere*). Poço 256.

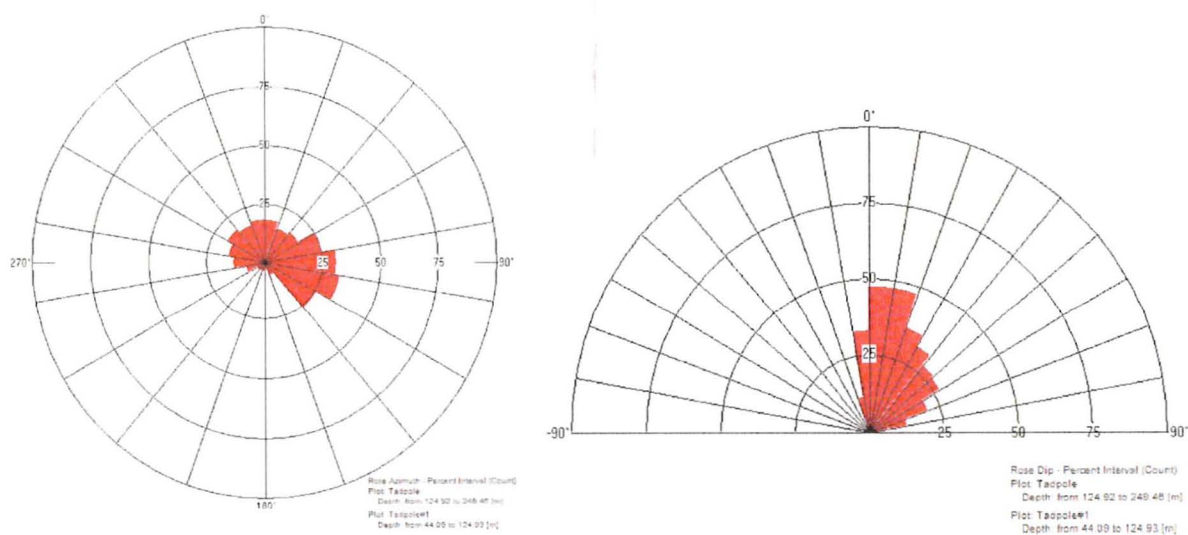


Figura 20. Diagramas em roseta. Azimute (à esquerda) e Mergulho (à direita). Poço 1204.

O valor de transmissividade total simulado pela planilha FLASH com um raio de influência de 30 m foi de 17,52 ft²/day (1,6 m²/dia) e o perfil de fluxo completo é apresentado no Gráfico 3.

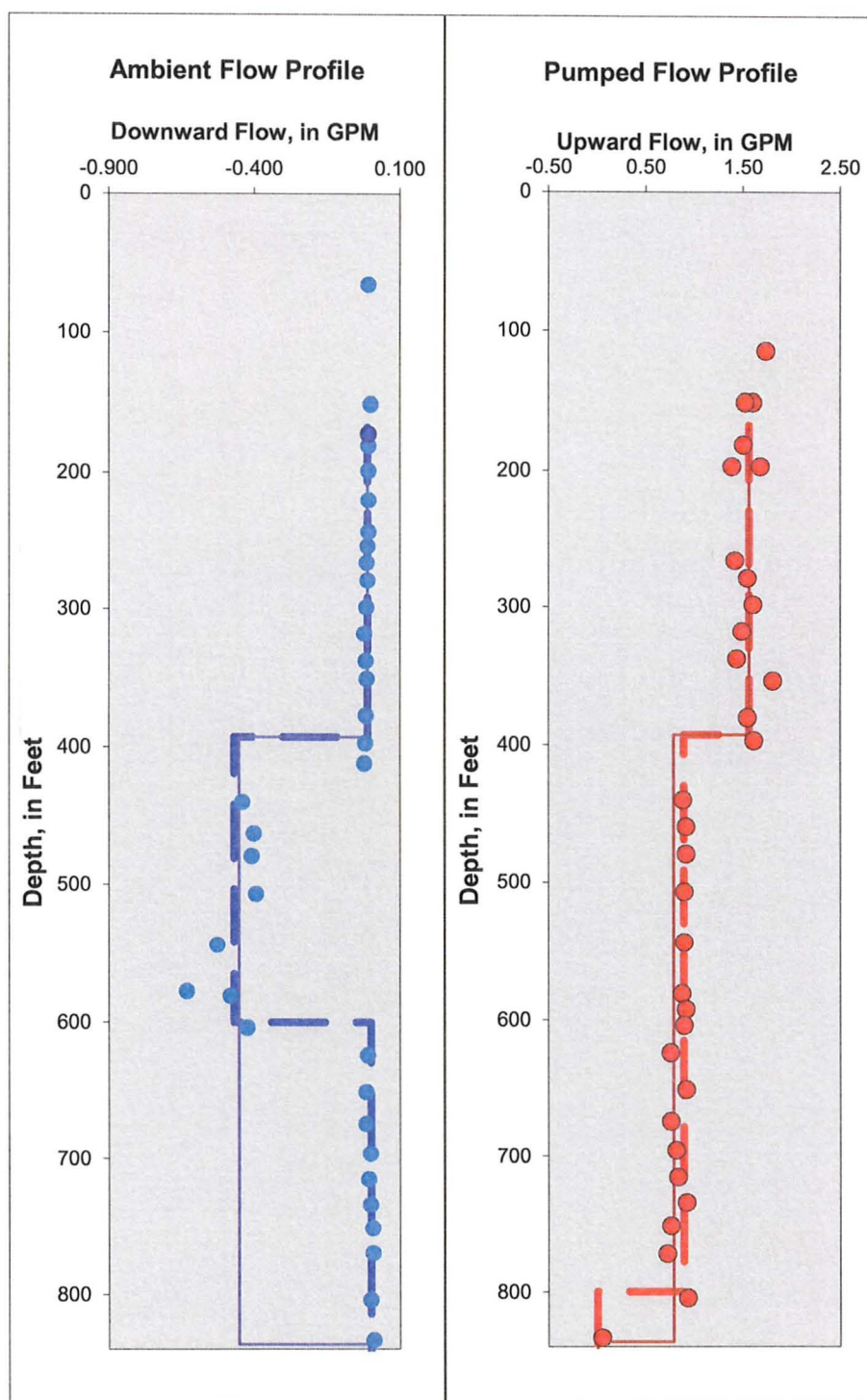


Gráfico 3: Log-flow (FLASH) do poço 1204.

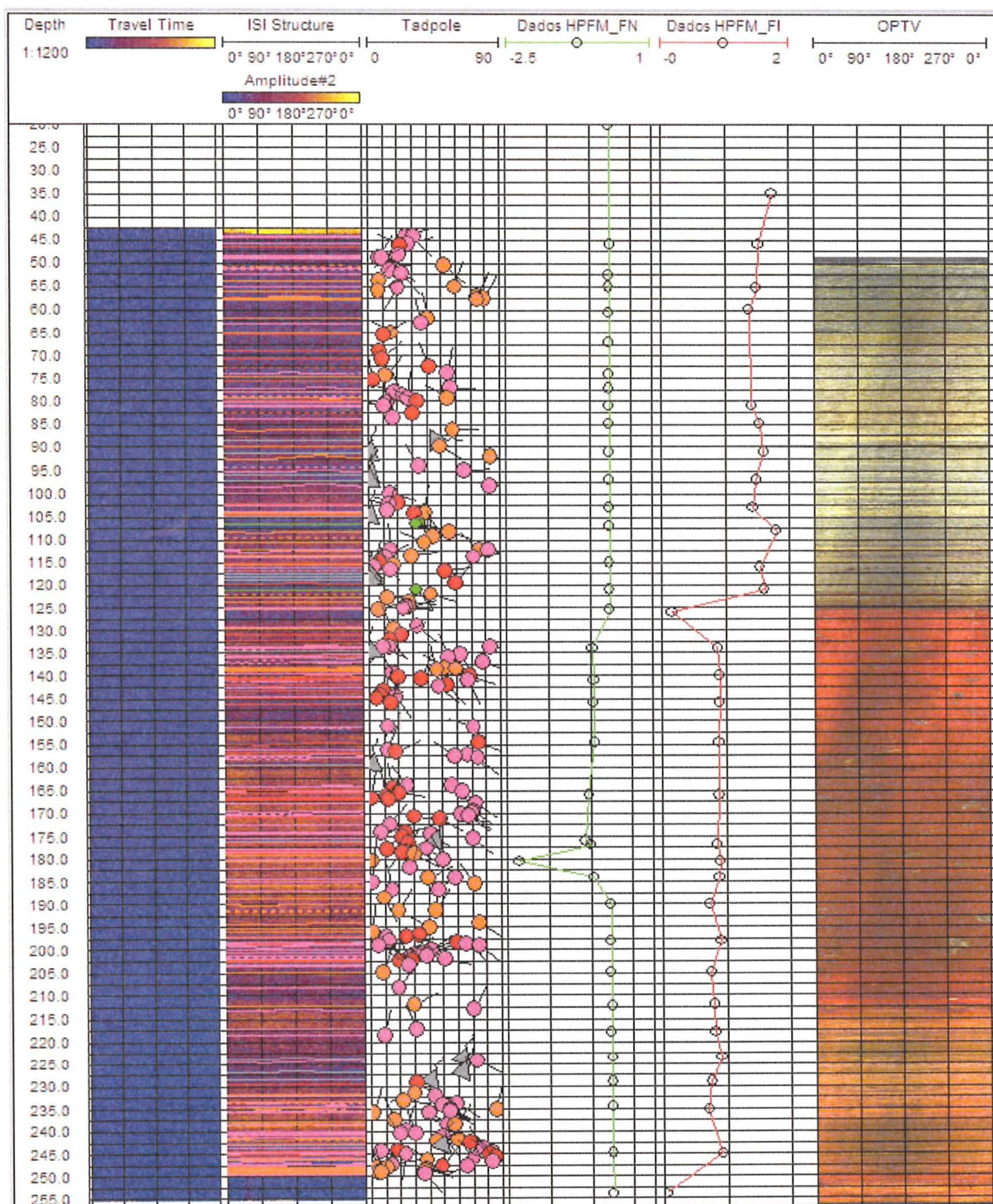


Figura 21: Perfis acústico, *tadpole*, fluxo (condições ambiente e com bombeamento) e filmagem. Poço 1204.

6. DISCUSSÃO

6.1. Poço 255

Com base no perfil *tadpole*, é possível observar uma homogeneidade na distribuição das fraturas ao longo do poço, com exceção de um trecho localizado entre as profundidades de 145 a 155 m onde não foi identificado nenhuma fratura, somente zonas não diferenciadas/destruídas (*Broken zone/Undifferentiated*). A homogeneidade permanece até aproximadamente 190 a 200 m de profundidade, a partir daí, verifica-se uma drástica diminuição de ocorrência de descontinuidades interceptadas pelo poço.

As estruturas identificadas apresentaram atitudes variadas com uma densa população na direção NW-SE como mostra a Figura 11 e o diagrama em roseta da Figura 12. Em relação aos mergulhos, observou-se duas modas distintas; fraturas com maior mergulho (70° a sub verticais) e fraturas com menor mergulho (10° a 30°). Baseado nas duas modas de valores de mergulho, atribuiu-se duas famílias distintas; Família I (maior mergulho) e Família II (menor mergulho). A abertura aparente das fraturas não foi utilizada como padrão para determinação de famílias pois não foi identificado um padrão de ocorrência de acordo com as atitudes.

O perfil de fluxo deste poço (Gráfico 1) exhibe duas zonas de fluxo com vazões distintas. No ensaio com condições ambiente de fluxo a divisão das zonas é localizada a aproximadamente 80 – 90 m (240 ft) de profundidade. Na porção superficial do poço, as medições indicaram um fluxo ascendente de 0,04 GPM (*Galons Per Minute*) ou 0,15 L/min (Litros por Minuto). No trecho abaixo da divisão, o fluxo tende a descendente com valores aproximados de 0,015 GPM (0,05 L/min), porém estes valores são baixos e tendem ao fluxo nulo. O perfil referente ao ensaio com bombeamento aparentemente exhibe três zonas de fluxo. Contudo, foi constatado durante o campo e confirmado pela análise da filmagem que os pontos localizados de aproximadamente 70 - 80 m para cima possuem resultados que não condizem com a realidade pois há um aumento no diâmetro do poço. Sendo assim, os *diverters* perdem o efeito de isolar o trecho e parte do fluxo que deveria ser quantificado dentro do *flowmeter* acaba percorrendo o espaço entre a parede do poço e o equipamento e consequentemente reduzindo o valor de fluxo neste trecho. A zona seguinte se estende até a profundidade de 150 m (460 ft) e apresenta fluxo ascendente de 1,5 GPM (5,6 L/min). De 150m até o fundo do poço, o fluxo torna-se nulo. Com base nos valores de fluxo apresentados, interpretou-se as possíveis zonas com entrada e saída de água no poço, ou seja, os trechos que possuem fraturas mais transmissivas (Quadro 1).

Quadro 1. Zonas de fluxo identificadas no poço 255 por ensaios com e sem bombeamento.

Ensaio sob condições Ambientes						
Trecho do FLASH	Intervalo		Fluxo		Zonas de fluxo (m de prof.)	Entrada ou Saída de água
	metros	feet	(L/min)	GPM		
1	0-90	0-240	0,15	0,04	75-85	Entrada
2	90-300	240-900	-0,05	-0,015	155-165	Saída
Ensaio com bombeamento						
Trecho do FLASH	Intervalo		Fluxo		Zonas de fluxo (m de prof.)	Entrada ou Saída de água
	metros	feet	(L/min)	GPM		
1	0-150	0-460	5,6	1,5	75-85	Entrada
2	150-300	460-900	0	0	-	-

Os dados de campo são discrepantes com o modelo simulado pela planilha principalmente no gráfico referente ao ensaio com bombeamento. Esta diferença é atribuída à variação do diâmetro do poço conferindo valores de fluxo não acurados e também justificando a discordância entre a simulação e o dado. Apesar destas diferenças, os ensaios apresentaram trechos com entrada e saída de água condizentes, porém com uma variação nas profundidades das zonas. Contudo, a verificação de tais discordâncias pontuais sempre deve ser realizada para que os resultados sejam robustos.

A Figura 13 permite uma correlação entre as fraturas identificadas e as mudanças de fluxo, ou seja, estabelecer quais fraturas são responsáveis pela entrada e saída de água do poço. Na zona 1, identifica-se fraturas de maior abertura entre 75 e 85 m que fornecem água para o poço. Na zona 2, observa-se um trecho entre 155 a 165 m que possui fraturas de maior abertura e é coincidente com a mudança de fluxo medido, portanto determinou-se uma saída de água nesta porção.

6.2. Poço 256

As estruturas identificadas no poço concentram-se na faixa de 80 a 180 m de profundidade devido à baixa resolução dos imageamentos obtidos nas demais profundidades.

De acordo com a Figura 14 e o um dos diagramas presente na Figura 15, as estruturas identificadas em geral estão orientadas segundo a direção W-E e apresentam mergulhos na faixa de 20° a 60°. Não foram identificadas famílias distintas neste poço.

O Gráfico 2 mostra que o perfil de fluxo sem bombeamento foi dividido nas seguintes zonas: 1 – Fluxo nulo de 0 - 115 m (350 ft). 2 – De 115 a 230 m (710 ft) e fluxo descendente de 0,11 GPM (0,42 L/min). 3 – De 230 m até o fundo do poço apresentando fluxo nulo. O ensaio com bombeamento apresentou os três trechos listados a seguir: 1 – Da boca do poço até 115 m (350 ft) com fluxo ascendente de 0,73 GPM (2,76 L/min). 2 – De 115 a 230 m (710 ft) e fluxo ascendente de 0,29 GPM (1,1 L/min). 3 – De 230 m até o fundo do poço com fluxo nulo. A compilação dos resultados obtidos é apresentada no Quadro 2.

Quadro 2. Zonas de fluxo identificadas no poço 256 por ensaios com e sem bombeamento.

Ensaio sob condições Ambientais						
Trecho do FLASH	Intervalo		Fluxo		Zonas de fluxo (m de prof.)	Entrada ou Saída de água
	metros	feet	(L/min)	GPM		
1	0-110	0-350	0	0	-	-
2	110-230	350-710	-0,42	-0,11	110	Entrada
3	230-300	710-900	0	0	-	-
Ensaio com bombeamento						
Trecho do FLASH	Intervalo		Fluxo		Zonas de fluxo (m de prof.)	Entrada ou Saída de água
	metros	feet	(L/min)	GPM		
1	0-110	0-350	2,76	0,73	-	Entrada
2	110-230	350-710	1,1	0,29	110	Entrada
3	230-300	710-900	0	0	-	-

Os valores de medição de fluxo ocorrem de maneira muito dispersa aumentando o desvio padrão da reta que interpola os pontos e define as zonas de fluxo. Essa flutuação é atribuída às diversas irregularidades na parede do poço (estreitamento/alargamento de trechos e buracos) detectadas nos perfis geofísicos e na filmagem.

Comparando os gráficos dos dois ensaios, observa-se que houve uma mudança no sentido de fluxo pois nas medições da zona 2 sob condições ambientais há uma tendência de fluxo descendente. Em contraposição, no mesmo trecho as medidas de fluxo com bombeamento apresentaram sentido ascendente. Este resultado devido ao bombeamento executado no ensaio.

Outra diferença observada é que no primeiro ensaio a zona 1 não apresentou fluxo, enquanto que no segundo, houve fluxo ascendente. Esta diferença pode ser atribuída as

variações na hidrodinâmica causadas pelas mudanças na carga hidráulica no poço. Neste caso em específico, a hipótese é que o bombeamento provocou a indução de fraturas que não eram detectadas sob condições ambientes.

A Figura 17 apresenta uma concentração de fraturas a aproximadamente 110 m de profundidade coincidente com o trecho do poço onde verifica-se uma mudança nos perfis de fluxo. Sendo assim, nesta porção estão localizadas as fraturas de maior transmissividade. Nos demais trechos não foi possível estabelecer uma correlação entre as estruturas pois tanto os imageamentos quanto os perfis de fluxo, não apresentaram resultados consistentes.

6.3. Poço 1204

As fraturas possuem uma distribuição heterogênea ao longo do perfil, ou seja, há trechos com uma grande densidade de descontinuidades por metro e outros com quase nenhuma estrutura. Neste poço, observa-se uma diminuição brusca na quantidade de fraturas no trecho de 150 a 175 m de profundidade e uma concentração elevada de estruturas no trecho 200 a 220 m.

A Figura 17 expõe que as estruturas identificadas apresentaram uma forte tendência na direção NW-SE com algumas variações locais. O diagrama de roseta para os azimutes das fraturas reforça a tendência (NW-SE) observada no diagrama Schmidt-Lambert (Figura 18). O diagrama em roseta de mergulhos das estruturas (Figura 18) exibe uma densa população com baixo ângulo (0° a 20°) e poucas estruturas subverticais. Baseado nas atitudes plotadas nos diagramas definiu-se a atitude média das fraturas como NW-SE com mergulho médio de 10° para SW.

O Gráfico 3 apresenta os perfis de fluxo do poço. No ensaio em condições ambientes é possível identificar três zonas de fluxo distintas: 1 – Da boca do poço até 135 m (430 ft) com fluxo zero. 2 – De 135 a 190 m (600 ft) com o valor de fluxo de -0,44 GPM (-1,66 L/min). 3 – De 190 a 260 m (830 ft). No ensaio com bombeamento foi identificado três zonas: 1 – Da boca do poço até 125 m (400 ft) com fluxo ascendente de 1,5 GPM (5,67 L/min). 2 – De 125 a 250 m (800 ft) o fluxo é ascendente e com valor aproximado de 0,5 GPM (1,89 L/min). 3 – De 250 – 260 m (830 ft) o fluxo é zero.

Quadro 3. Zonas de fluxo identificadas no poço 1204 por ensaios com e sem bombeamento.

Ensaio sob condições Ambientes						
Trecho do FLASH	Intervalo		Fluxo		Zonas de fluxo (m de prof.)	Entrada ou Saída de água
	metros	feet	(L/min)	GPM		
1	0-135	0-430	0	0	-	-
2	135-190	430-600	-1,66	-0,44	140-145	Entrada
3	190-260	600-830	0	0	-	-
Ensaio com bombeamento						
Trecho do FLASH	Intervalo		Fluxo		Zonas de fluxo (m de prof.)	Entrada ou Saída de água
	metros	feet	(L/min)	GPM		
1	0-125	0-400	5,67	1,5	140-145	Entrada
2	125-250	400-800	1,89	0,5	245	Entrada
3	250-260	800-830	0	0	-	-

Os resultados dos ensaios neste poço apresentaram padrão semelhante aos do poço 256, ou seja, a medição sob condições ambiente apresentou sentido descendente, enquanto que no ensaio com bombeamento o sentido foi oposto. Assim como no caso do poço 256, a perfilagem de fluxo do poço 1204 apresentou variação similar, ou seja, de fluxo nulo sob condições normais, passou a apresentar fluxo ascendente no ensaio com bombeamento. Durante o tratamento de dados, foi observado um valor anômalo a 125 m de profundidade que foi desconsiderado por se tratar de uma medição isolada e atribuído às medições imprecisas decorrente das imperfeições no poço.

Com base na análise da Figura 21 é possível observar que no trecho de 140 a 145 m ocorrem diversas fraturas classificadas como “de maior abertura” (>1 cm de abertura aparente). Este trecho situa-se imediatamente abaixo de onde foi detectado uma mudança no regime de fluxo do poço (120 – 130 m). Outra porção do poço que também apresenta concentração elevada de estruturas está localizada a aproximadamente 245 m e também caracteriza uma mudança nas medições de fluxo.

6.4. Discussão Integrada

A distribuição das fraturas nos poços 255 e 1204 apresentaram o mesmo padrão, dois trechos com maior homogeneidade de ocorrência de descontinuidades separados por um

intervalo intermediário com uma população menor de estruturas como foi verificado na discussão individual de cada poço. Tal padrão não foi observado no poço 256.

A orientação das estruturas apresentou uma tendência geral para NW-SE nos poços 255 e 1204 e W-E para o poço 256. No poço 255 definiu-se duas famílias de fraturas distintas com base no mergulho destas, uma com maior ângulo e outra com menor ângulo. Já no poço 1204, foi identificado apenas uma população com maior densidade de ocorrência e seu mergulho varia de 0° a 20°. Esta população é condizente com a família II (menor mergulho) definida no poço 255. O aquífero é extremamente heterogêneo, conseqüentemente a análise estrutural do meio torna-se complexa. Portanto, quanto maior o número de poços estudados melhor será o modelo estrutural para este aquífero cristalino. Outro fator que contribui para a complexidade do estudo estrutural é o intenso dobramento e deformação característico das rochas gnáissicas que compõe o embasamento cristalino da região (Fiume, 2013).

Os perfis de fluxo obtidos nos três poços estudados permitem, de maneira consistente, identificar zonas com maior ou menor transmissividade e conseqüentemente correlacionar a fraturas que promovem a entrada e saída de água no poço. A localização dos trechos com maior transmissividade é o primeiro passo para a determinação das fraturas que controlam o transporte de água e contaminantes ao longo do aquífero fraturado (NAP, 2015). Portanto os resultados obtidos neste trabalho, ainda que muito localizados, mostraram que o método apresenta resultados consistentes e servem como base para aplicação nos demais poços na região.

Considerando o contexto regional e os estudos acerca da contaminação por passivos industriais, o presente estudo é relevante pois compõe a fase inicial da aquisição de dados necessários para uma futura modelagem matemática. Um modelo matemático para o aquífero fraturado na região é de suma importância para a futura investigação, avaliação e escolha dos métodos de investigação remediação.

Ao longo do desenvolvimento do projeto houve algumas alterações no escopo do trabalho devido à viabilidade de execução dentro do prazo estipulado. A primeira mudança foi a redução no número de poços propostos no Projeto Inicial devido a problemas de logística em relação ao acesso aos poços instalados na empresa Sandvik. A segunda mudança foi a redução dos métodos de investigação pois constatou-se que o prazo não era compatível com todos os ensaios propostos. Sendo assim, optou-se por excluir os ensaios com obturadores (*packers*). Além das mudanças no escopo, também foram identificadas algumas complicações durante a atividade de

campo, como o exemplo do poço 256 que apresentou diversas irregularidades e buracos ao longo das perfilações.

Durante os trabalhos de campo constatou-se que o equipamento utilizado para as medições de fluxo, possui um limite máximo de detecção de aproximadamente 6 L/min. Portanto ensaios com vazões mais altas não são possíveis com este *flowmeter*.

Mesmo com as mudanças e imprevistos supracitados, os objetivos foram atingidos de maneira satisfatória, uma vez que, os produtos finais são condizentes com o que foi proposto, ou seja, a caracterização estrutural e a perfilação de fluxo dos três poços locados no SP Market.

7. CONCLUSÕES

As principais conclusões do estudo estão dispostas a seguir:

- i. Os dados da filmagem e dos perfis geofísicos, tratados no Wellcad, permitiram a caracterização das fraturas nos poços 255 e 1204. Os resultados obtidos do poço 256 foram pouco representativos devido a qualidade do imageamento.
- ii. Os dados confirmam a grande heterogeneidade e anisotropia do aquífero presente na literatura. Apesar da heterogeneidade do meio, foi possível determinar uma orientação geral de NW-SE para as fraturas interceptadas pelos poços. No caso do poço 255, ainda foi possível separar duas famílias distintas baseado nos mergulhos das estruturas.
- iii. A utilização das medições sob condições ambiente e com bombeamento apresentou resultados robustos para a determinação da variação do fluxo de acordo com a profundidade.
- iv. A utilização do *software* Wellcad combinado com a planilha FLASH (USGS) possibilitou a determinação de zonas com maior transmissividade e até mesmo trechos específicos de entrada e saída de água no poço. Esta combinação foi utilizada de maneira inédita no país e por isso ainda deve ser aperfeiçoada. Contudo, o método aprimora os modelos de perfilação de fluxo em um poço.
- v. A aplicação do método de medição de fluxo com bombeamento e a utilização da planilha FLASH são pioneiros no Brasil e, portanto, estão sujeitos a ajustes e aprimoramentos.

- vi. Os resultados obtidos neste estudo compõem o banco de dados para uma futura modelagem matemática do aquífero fraturado da região. Para tanto, é necessária uma extensiva coleta de dados em poços da região.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M. 1967. Origem e evolução da plataforma brasileira. Bol. Div. Geol. Min., 241.136.
- ALMEIDA, F.F.M de, AMARAL, G., CORDANI, U.G., KAWASHITA, K. 1973. *The pre-cambrian of the South American cratonic margin South of the Amazon River*. In: Nairn, E.M. & Stehli, F.G. (Eds.) *The ocean basins and margins*. Plenum, p.: 411-446.
- ALMEIDA, F.F.M. 1976. *The system of continental rift bordering the Santos Basin, Brazil*. In: Anais da Academia Brasileira de Ciências, (48), suplemento: 15-26.
- BARBOSA, M. B. (2015). Sistema de Informações Geográficas Aplicado ao Gerenciamento da Contaminação da Antiga ZUPI 131, Jurubatuba, São Paulo. Dissertação (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 138 p.
- BERTOLO, R. A. 1996. Relação entre rios e o Aquífero Sedimentar da Bacia de São Paulo em Área de Exploração Intensiva de Água Subterrânea. Tese de Mestrado. 16-28 p.
- CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. (2015). Áreas Contaminadas Críticas. Fonte: Áreas Contaminadas: <http://www.cetesb.sp.gov.br/>
- COELHO, M. N. G. (2007). O movimento sindical metalúrgico na zona Sul de São Paulo: 1974 – 2000. Dissertação (Doutorado), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, p.: 30 – 44.
- COUTINHO, J.M.V. (1980). Carta geológica da Região Metropolitana da Grande São Paulo. São Paulo, EMPLASA, mapa geológico, 1:100.000, 2 fl.
- DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA, IG – INSTITUTO GEOLÓGICO. (2009). Projeto Jurubatuba: restrição e controle de uso de água subterrânea / Departamento de Águas e Energia Elétrica, Instituto Geológico, Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Secretaria de Estado de Saneamento e Energia. – São Paulo : DAEE/IG, 2009. 109 p. :il. – Cadernos do Projeto Estratégico Aquíferos, n 01.
- DAY-LEWIS, F.D., JOHNSON, C.D., PAILLET, F.L., HALFORD, K.J. (2011). *A computer program for flow-log analysis of single holes (FLASH): Groundwater*, doi: 10.1111/j.1745-6584.2011.00798.x

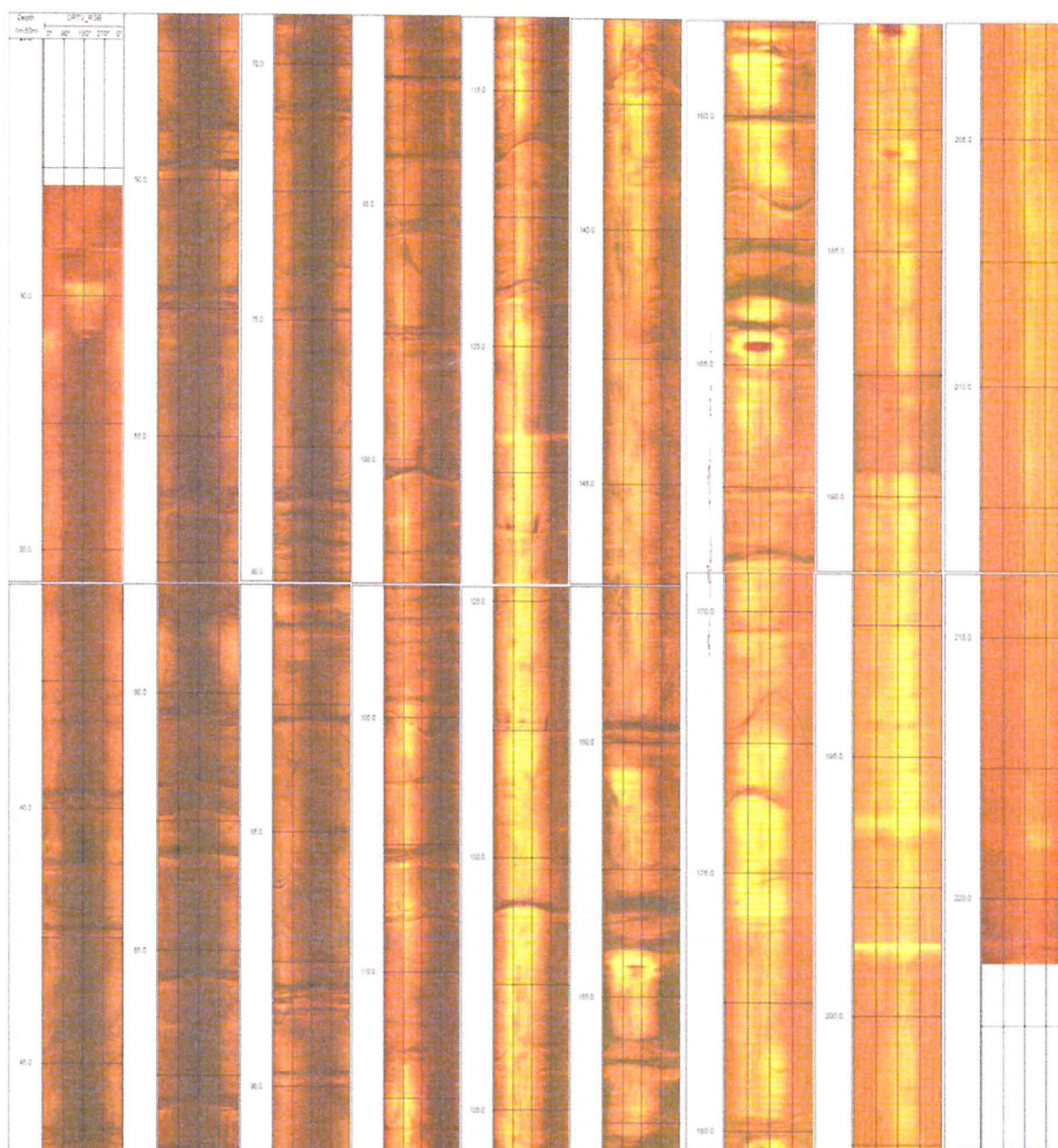
- DOMENICO, P. & SCHWARTZ, F. 1990. *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley & Sons, Nova York, 824 p.
- FERNANDES, A. J. 1991. O Complexo Embu no leste do estado de São Paulo: contribuição ao conhecimento da litoestratigrafia e da evolução estrutural e metamórfica. Dissertação (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 120 p.
- FERNANDES, A.J., PERROTTA, M.M., SALVADOR, E.D., AZEVEDO, S.G., GIMENEZ FILHO, A., PAULOM, N. (2007). Potencial dos aquíferos fraturados do Estado de São Paulo: condicionantes geológicos. *Águas Subterrâneas*, São Paulo
- FIUME, B. (2013). Geologia estrutural de detalhe para elaboração de modelo conceitual de circulação de água subterrânea: estudo de caso em Jurubatuba, SP. Tese (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 165 p.
- FREEZE, R.A., CHERRY, J.A. 1979. *Groundwater*. Prentice Hall, New Jersey, p. 604.
- HASUI, Y. 1975. Geologia da Folha São Roque, São Paulo. *Boletim IG – USP*. 6: 95-108.
- HEILBRON, M., PEDROSA-SOARES, A.C., CARLOS, L., ALLARD, R., TROUW, J. 2004. Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO, V., BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R., BRITO-NEVES, B.B. (eds.). *Geologia do continente Sul-americano; evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca
- HIRATA, R. & FERREIRA, L. 2001. Os aquíferos da bacia hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. *Revista Brasileira de Geociências*, **31(1)**: 43-50.
- JOHNSON, C.D., HAENI, F.P., LANE, Jr., J. W., and WHITE, E.A. 2002. *Borehole-Geophysical Investigation of the University of Connecticut Landfill, Storrs, Connecticut, United States Geological Survey Water - Resources Investigation Report 01-4033*, 187 p.
- L'APICCIRELLA, E. S. P. (2009). Contaminação e áreas de restrição de uso de água subterrânea no entorno do canal Jurubatuba em São Paulo – SP. Tese (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 136 p.
- NAP – NATIONAL ACADEMIES PRESS (2015). *Characterization, Modeling, Monitoring, and Remediation of Fractured Rock – Committee on Geological and Geotechnical Engineering of The National Academies of Sciences, Engineering and Medicine – Washington, DC*. 26 p.
- PAILLET, F.L.; BARTON, C.; LUTHI, S.; RAMBOW, F.; ZEMANEK, J. 1990. *Borehole Imaging. Society of Professional Well Log Analysts, SPWLA Reprint Series*, Houston, Texas, 472 p.
- PAILLET, F.L. 1995. *Using borehole flow logging to optimize hydraulic-test procedures in heterogeneous fractured aquifers*, *Hydrogeology Journal*, v. 3, p. 4-20.
- PERROTTA, M.M., SALVADOR, E.D., LOPES, R.C., D'AGOSTINO, L.Z., PERUFFO, N., GOMES, S.D., SACHS, L.L.D., MEIRA, V.T., LACERDA, J.V. 2005. Mapa geológico do Estado de São Paulo (*Geologic map of the state of São Paulo*), 1: 750.000, São Paulo.

- PARKER, B.L. 2011. *The discrete fracture network approach for investigating contaminated sites on fractured sedimentary rock*. School of Engineering, University of Guelph, Guelph-Ontario. Geohydro/2011.
- PMSP - PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO (2017). Fonte: Prefeitura Regional Capela do Socorro
http://prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/regionais/capela_do_socorro/historico/index.php?p=916 Acesso: 04/03/2017
- PMSP – PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO (2016). Nota Técnica: Arco Jurubatuba. Fonte: http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/ACJ_NotaTecnica.pdf. Acesso: 08/03/2017
- RIBEIRO, L.A.F.S. 2012. Perfilagens Geofísicas de poços tubulares profundos. Região do canal do Jurubatuba, São Paulo (SP). Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, p. 13 – 29
- RICCOMINI, C. 1989. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. São Paulo. Tese de Doutorado, IGc-USP, 256p.
- RICCOMINI, C., COIMBRA, A.M. (1992). Geologia da Bacia Sedimentar. In: Negro JR., A.; Ferreira, A.A.; Alonso, U.R.; Luz, P.A. (eds) Solos da Cidade de São Paulo. ABMS/ABEF, p. 37-94.
- RICCOMINI, C; SANT'ANNA, L.G.; FERRARI, A.L. 2004. Evolução geológica do rift continental do Sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO-NEVES, B.B. (eds.) Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Beca, p. 383-405.
- SABESP/CEPAS-IGc-USP (1994). Estudo hidrogeológico da Região Metropolitana de São Paulo. Mapa geológico em 1:100.000. Convênio SABESP/CEPAS-IGc-USP. 1 mapa.
- SNOW, D.T. 1968. Rock fracture spacings, openings, and porosities. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, 94: 73–91.
- WILLIAMS, J.H. & JOHNSON, C.D. 2004. *Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies: Journal of Applied Geophysics*, vol. 55, Issue 1-2, p. 151-159.

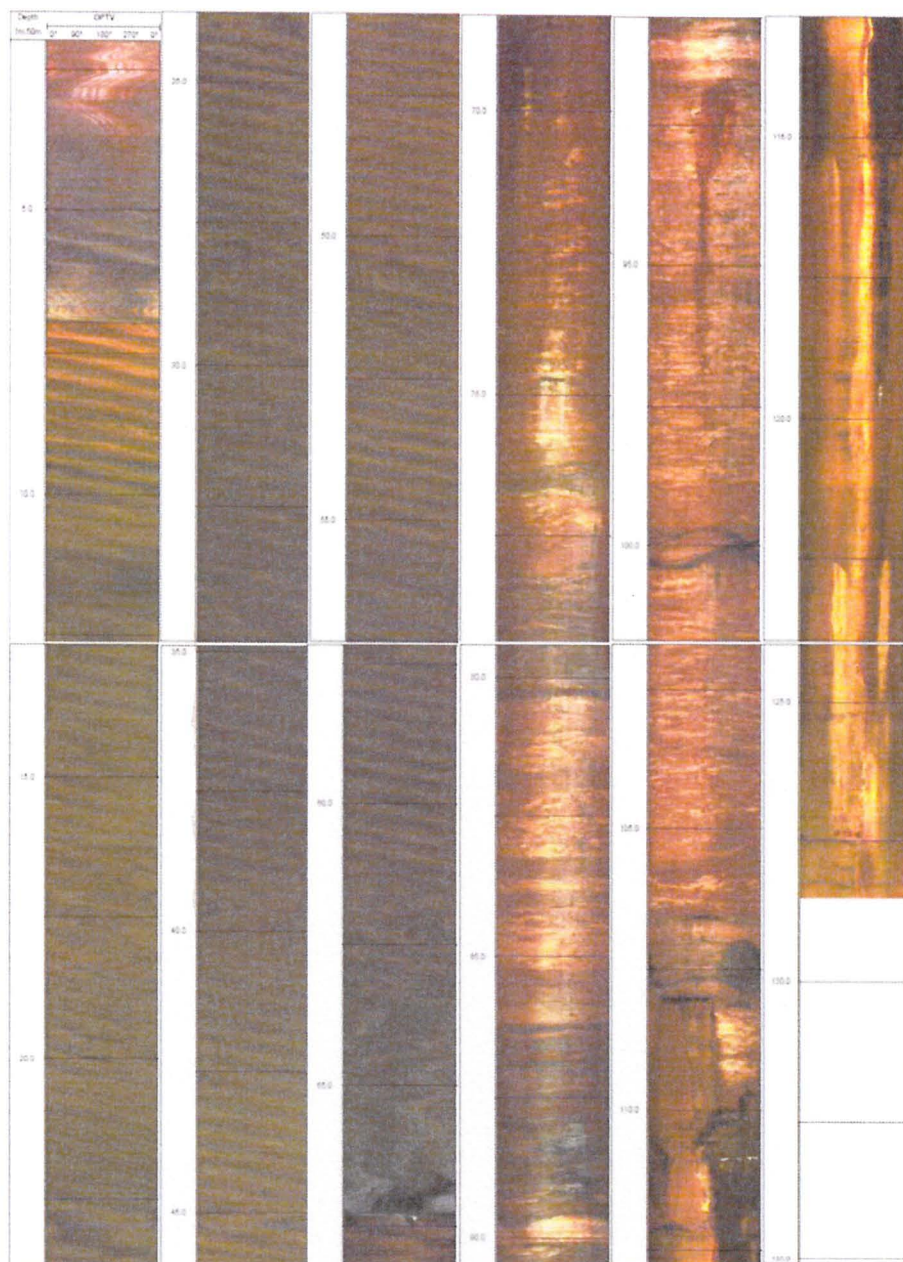
Anexo A

Logs de filmagem em maior detalhe

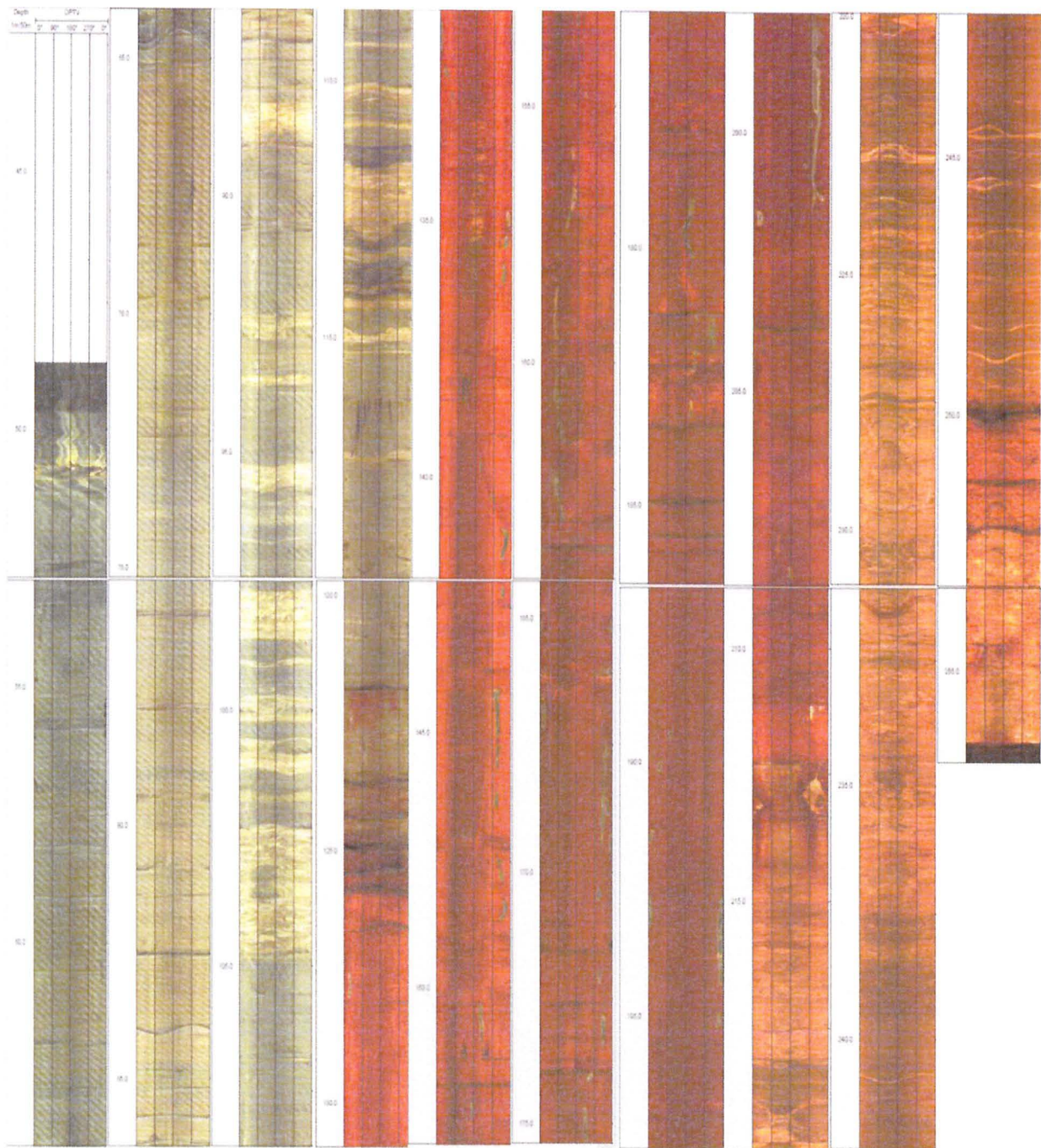
Poço 255



Poço 256



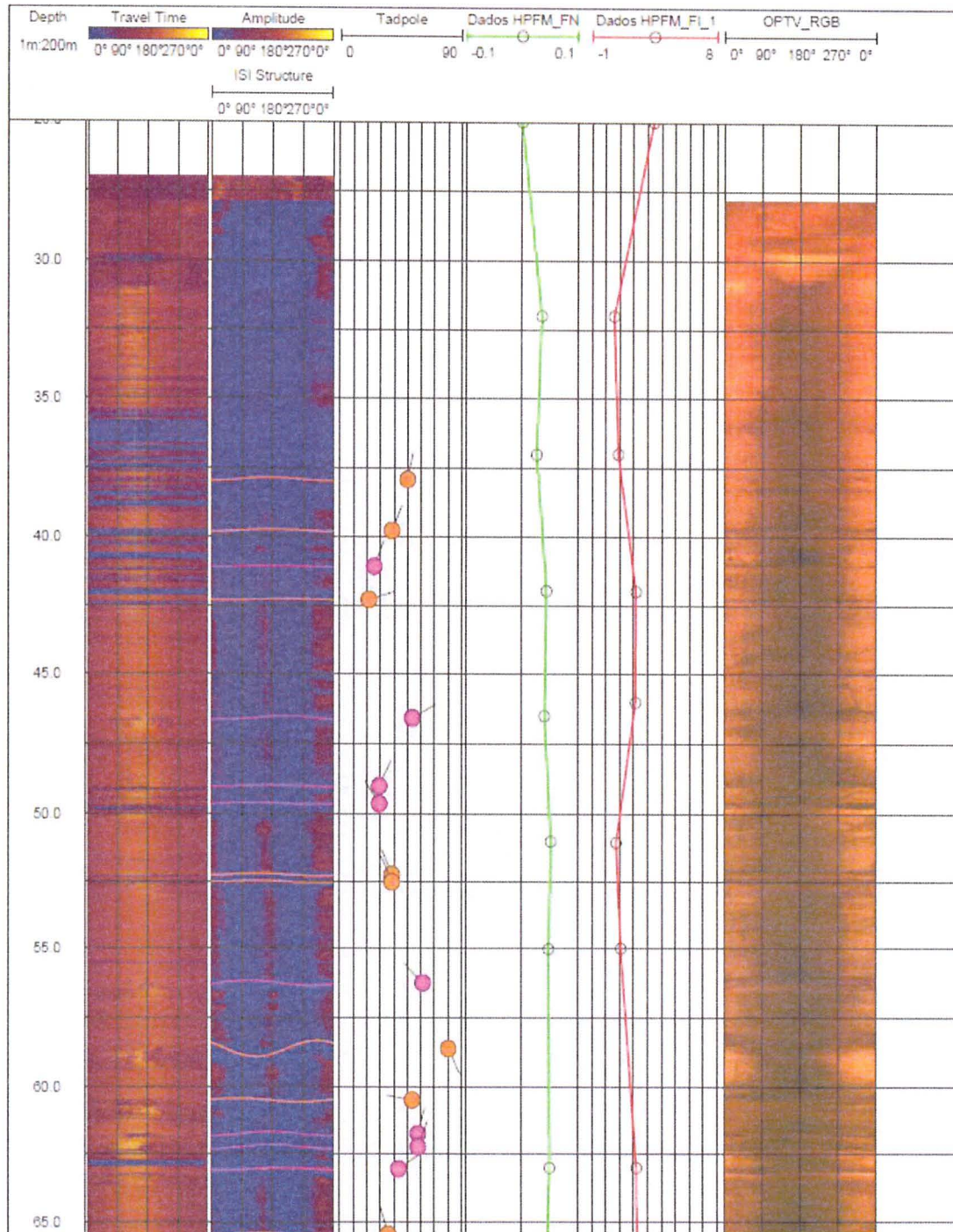
Poço 1204



ANEXO B

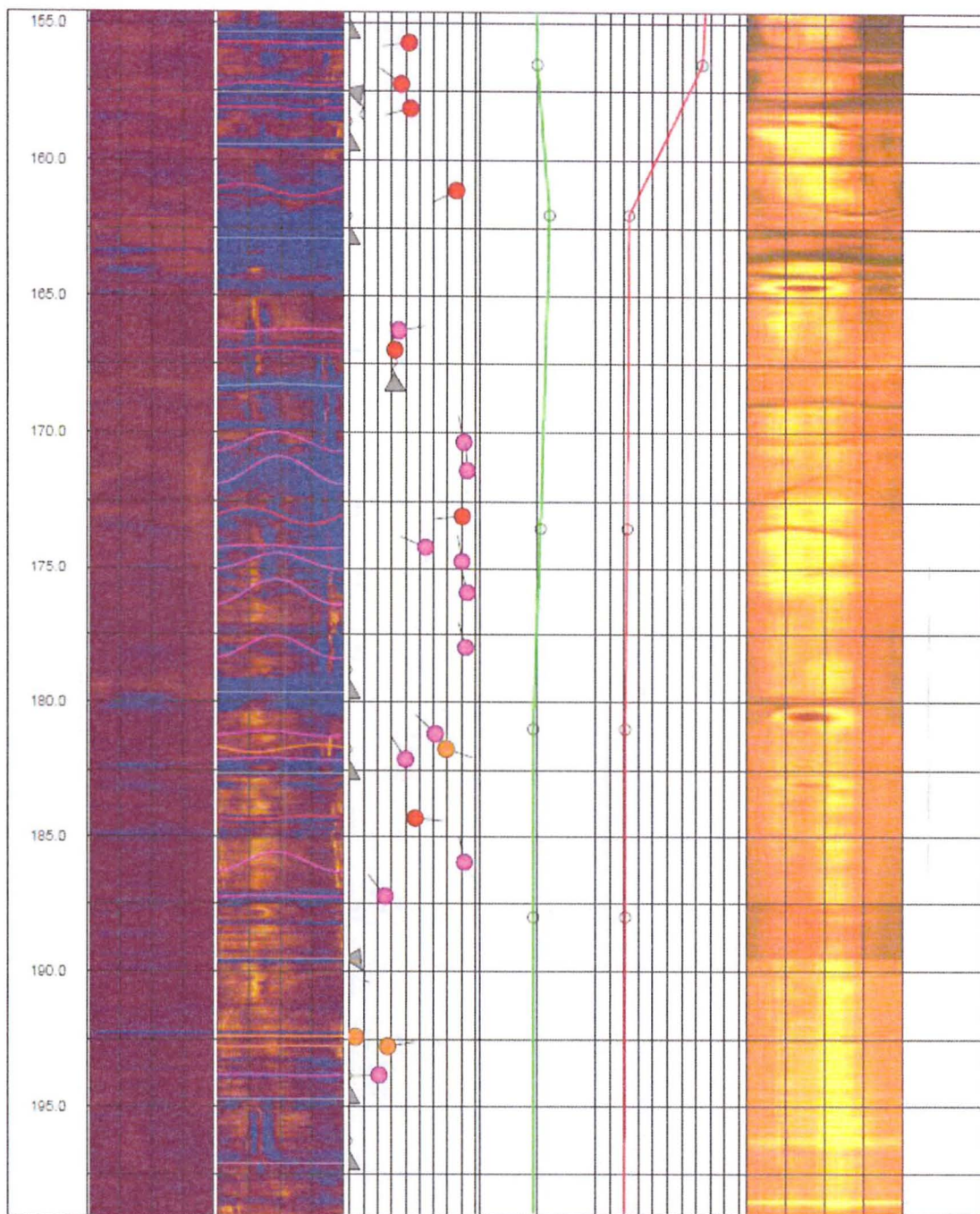
Perfis confeccionados no Wellcad em maior detalhe

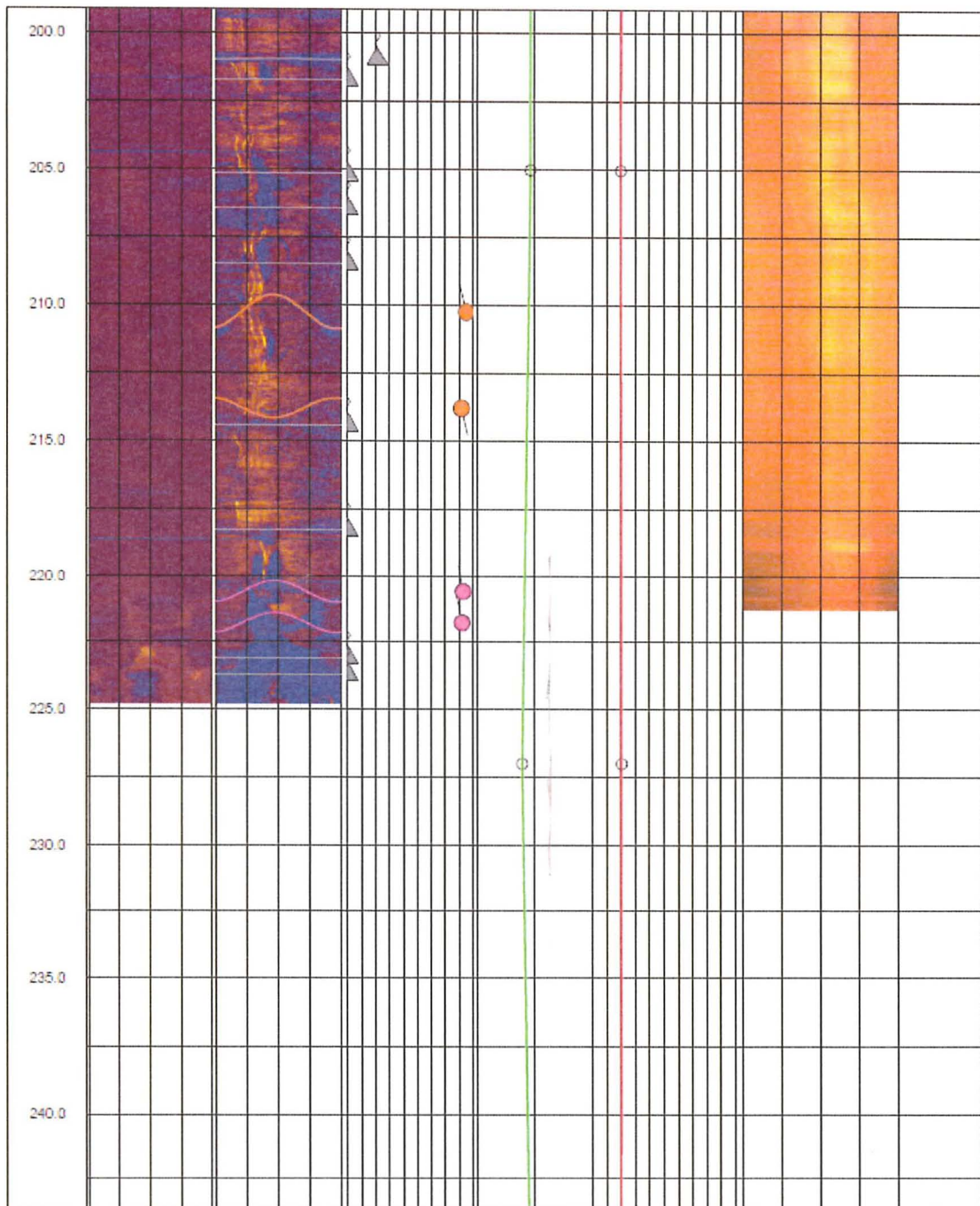
Poço 255



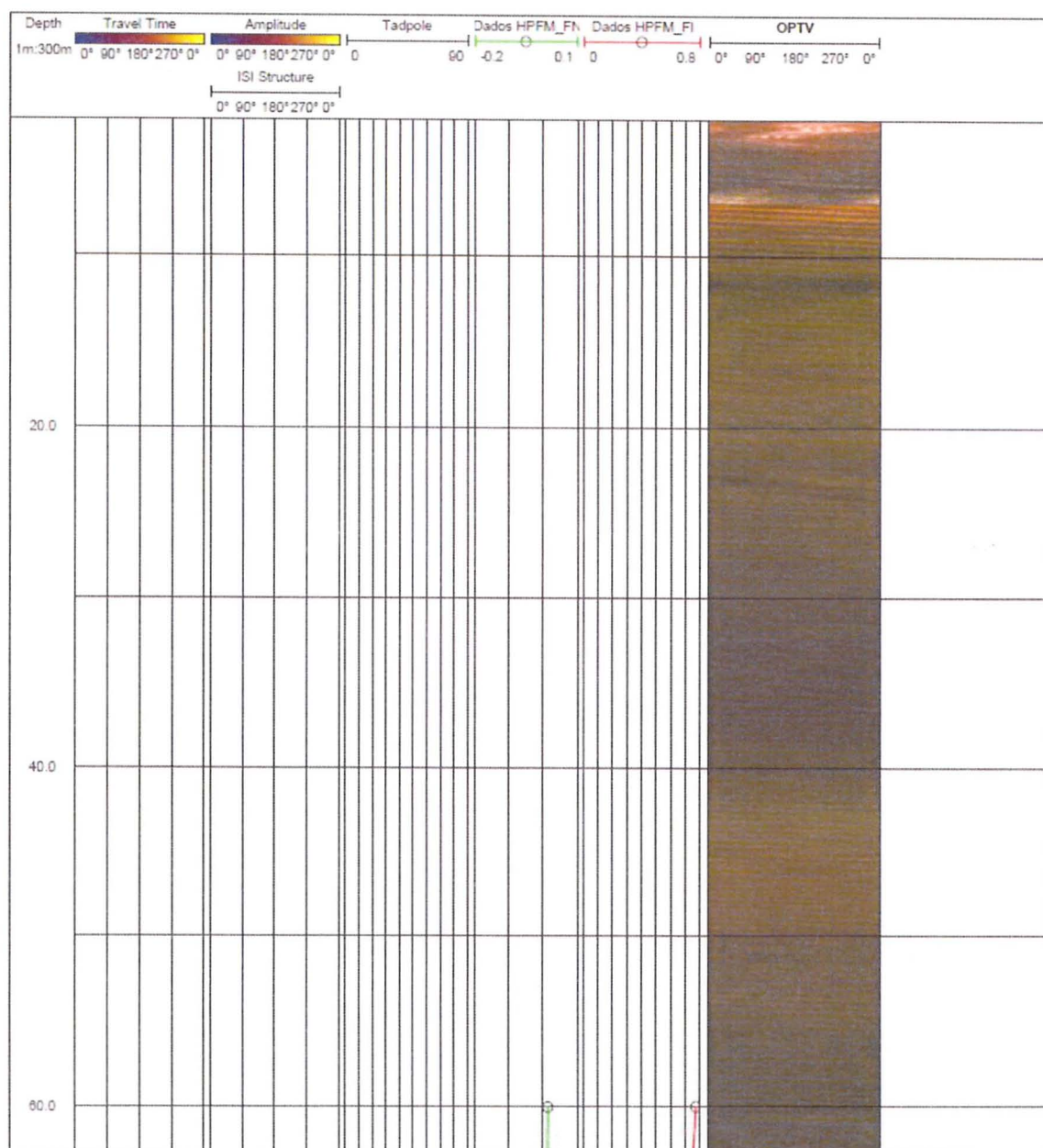


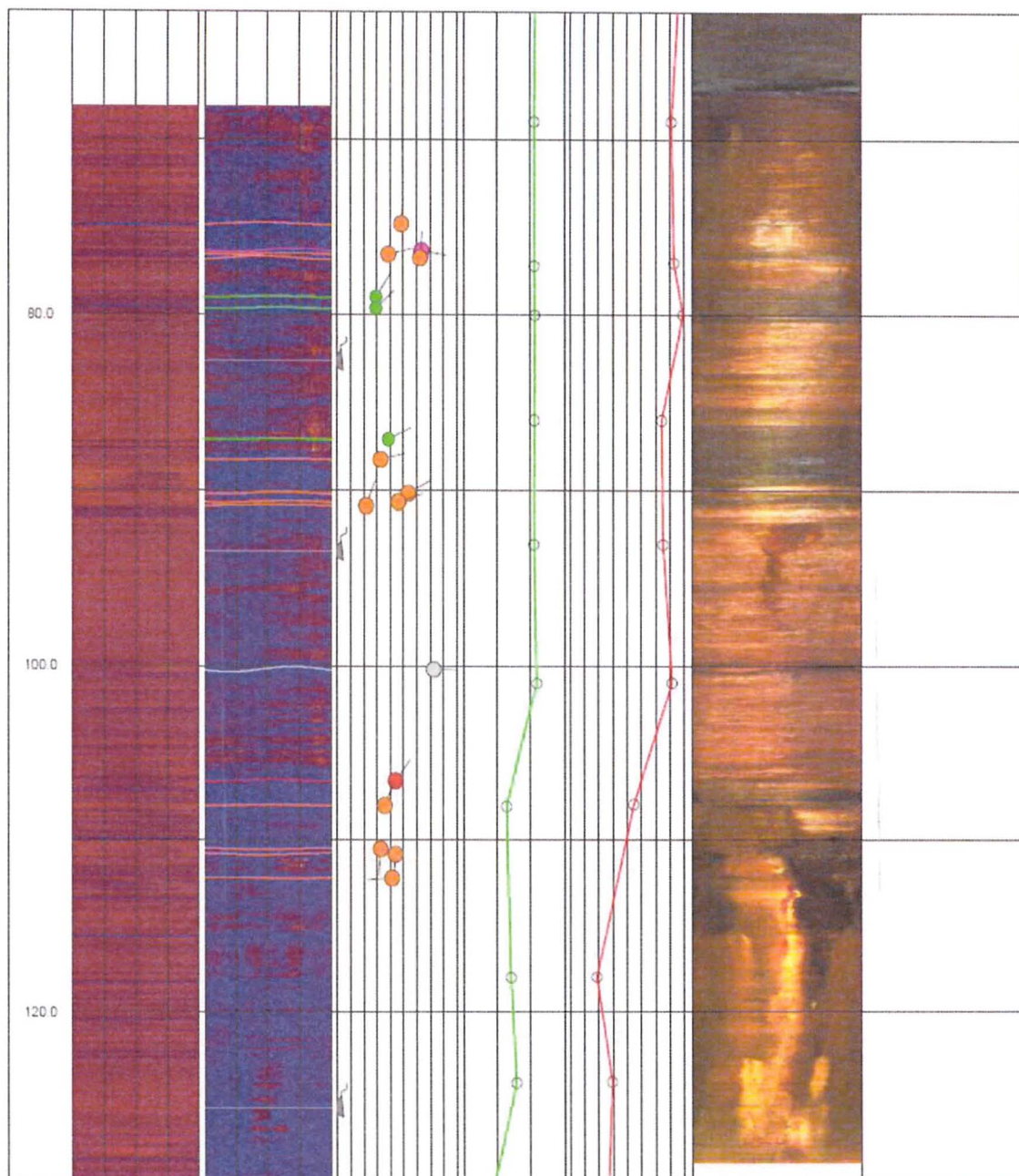


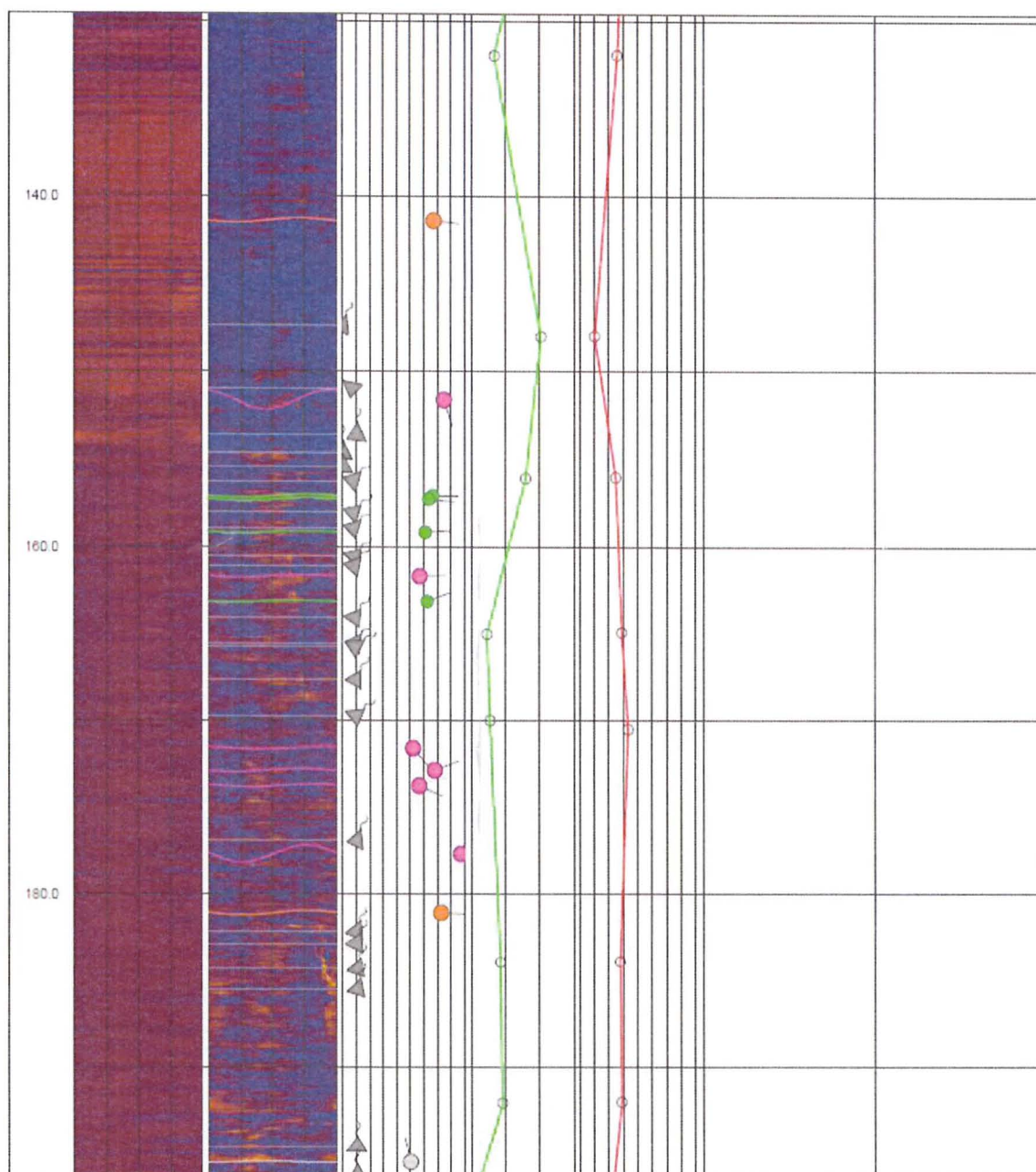


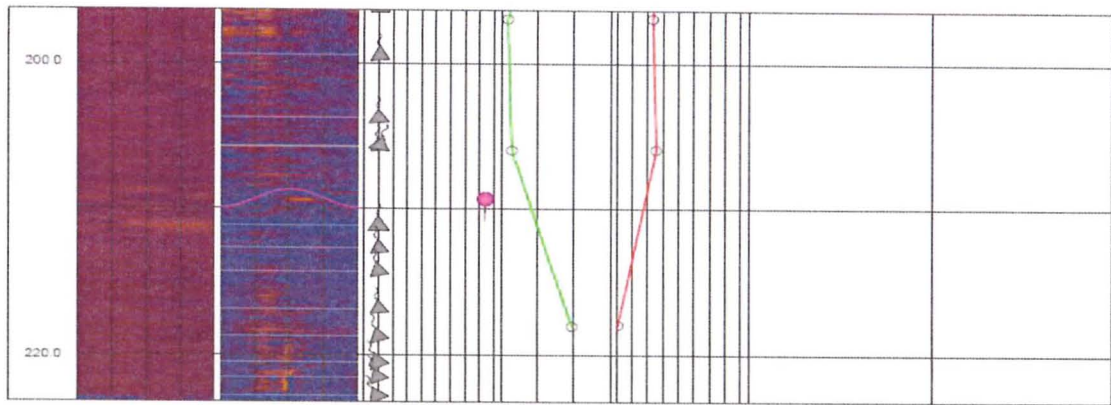


Poço 256









Poço 1204

