

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CONTRIBUIÇÃO À CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA
DE MACIÇOS FRATURADOS E SOLOS RESIDUAIS EM
PROJETOS DE OBRAS SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO
METROPOLITANA DE SÃO PAULO**

Marcelo Denser Monteiro

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Antonio Bertolo

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geociências - Área de Recursos Minerais e Hidrogeologia

Versão Corrigida

SÃO PAULO

2016

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.

Ficha catalográfica

Monteiro, Marcelo Denser

Contribuição à caracterização hidrogeológica de maciços fraturados e solos residuais em projetos de obras subterrâneas na Região Metropolitana de São Paulo / Marcelo Denser Monteiro – São Paulo, 2016.

112 p. + anexos

Dissertação (Mestrado): IGc/USP

Orient.: Bertolo, Reginaldo Antonio

1. Aquíferos Fraturados, 2. Perfilagem Óptica, 3. Aquífero Residual,
4. Ensaio de perda d'água sob pressão 5. Geologia Estrutural I. Título

Dedico este trabalho aos meus
pais, Clovis e Regina, que
dedicaram suas vidas em apoiar
os estudos dos seus filhos.

AGRADECIMENTOS

Neste momento concluo mais uma importante etapa da minha vida. Sempre tenho em mente que vivemos um constante aprendizado. Resiliência é a palavra chave para toda a vida.

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador, Prof. Reginaldo Bertolo, pelo apoio por toda essa difícil jornada. É a pessoa que tornou essa conquista possível. Sempre companheiro, paciente e atencioso.

Agradeço à minha esposa Agatha, que além de todo apoio incondicional nos períodos mais difíceis, me ajudou em muitas etapas deste trabalho. Nela encontrei a verdadeira definição para a palavra parceira.

Agradeço à Companhia do Metropolitano de São Paulo por autorizar e apoiar a realização deste estudo.

Agradeço à Profa. Amélia João Fernandes pela atenção e disposição em contribuir com este estudo.

Agradeço ao amigo e colega, Eng. Francisco Carlos Pelegate Dias por todo apoio e pela ajuda com as bases SIG.

Agradeço aos colegas de Metrô, Hugo Cássio Rocha, Argimiro Ferreira e Marco Aurélio Silva, que sempre me incentivaram na busca por este objetivo, ajudando em tudo que fosse possível.

Agradeço aos demais colegas do Metrô, Fabrícia, Xavier, Barbara, Fernanda, Anderson, Karina, Paula, Fernando, Guilherme, Sergio, Danielle, Wilson Poina, Wilson Ferreira e Enio, pela companhia, pelas risadas e pelas experiências em todo este período.

Às colegas Magali Gurgueira e Daniela Oliveira pelas discussões técnicas e pelas risadas

Agradeço ao núcleo familiar da minha infância, meu pai, minha mãe e meu irmão Márcio, por terem contribuído na formação da pessoa que sou hoje. Sinto uma enorme saudade daqueles tempos.

Agradeço a toda minha família, em especial minha madrinha Vera, que sempre apoiou e entendeu minhas ausências.

Agradeço à Pepê, por todas as alegrias e sorrisos que me trouxe em sua breve e querida passagem por este mundo.

RESUMO

MONTEIRO, M.D. 2016. Contribuição à caracterização hidrogeológica de maciços fraturados e solos residuais em projetos de obras subterrâneas na Região Metropolitana de São Paulo, 112 p.

Os materiais geológicos no entorno dos túneis são efetivamente os materiais de construção, pois toda obra subterrânea interage permanentemente com o material geológico adjacente, sendo necessário um amplo conhecimento da geologia do meio, de modo a dimensionar como ocorrerá essa interação, tanto na etapa de projeto, como na etapa de execução. O sucesso de uma obra subterrânea depende obrigatoriamente do conhecimento das características das rochas e de suas descontinuidades. Na área de estudo está se desenvolvendo o projeto de construção de uma nova linha de metrô cuja escavação terá importante interação com o maciço de rochas graníticas e gnáissicas situado próximo de uma importante zona de falhamentos geológicos, que influenciam significativamente na distribuição e ocorrências de fraturas. Um dos aspectos mais relacionados aos maciços fraturados é o comportamento hidrogeológico de suas descontinuidades, que pode intensificar processos de alteração do maciço, provocando a perda de condições geomecânicas. Este estudo teve início com a realização de sondagens, ensaios geofísicos e petrografia. O maciço tem topo rochoso bastante irregular e condicionado por falhamentos geológicos. A rocha predominante é um granito gnaisse, com ocorrências gnáisses milonitizado próximo às falhas. Em seguida foi avaliada a aplicação da perfilagem óptica para a análise estrutural do maciço, com a caracterização dos grupos de fraturas de maior ocorrência, bem como na identificação das descontinuidades com potencial para ocorrência de fluxo de água subterrânea por meio da observação sistemática das imagens das sondagens e consulta a testemunhos, procurando feições como abertura, oxidação de superfícies e alteração no maciço. A avaliação permitiu a seleção de intervalos visando a realização de ensaio de perda de água sob pressão. A análise estrutural identificou 8 grupos de fraturas no maciço. As fraturas de baixo ângulo de mergulho (grupo 1) e as fraturas NE-SW de mergulho alto a médio (grupos 2 e 3) são as de maior ocorrência. Fraturas NW-SE, com mergulho alto a médio (grupos 4 e 4a) possuem também significativa ocorrência. As fraturas N-S de baixo a médio mergulho (grupo 5) e estruturas de alto ângulo E-W e N-S (grupos 6 e 7) foram observadas em menor quantidade. O grupo 8 é representado por fraturas NE, com mergulho baixo a médio. Os ensaios hidráulicos mostraram que os grupos 5 e 3 são os que possuem maiores permeabilidades, seguido das fraturas de baixo mergulho (grupo 1). O grupo 2, que ocorre paralelo à foliação regional, apresentou os menores valores proporcionalmente. Posteriormente foi perfurado e instalado um poço de bombeamento no maciço fraturado, interceptando estruturas do grupo 4a. O ensaio de bombeamento foi realizado procurando avaliar a conexão entre os aquíferos fraturado e residual. Esta conexão se confirmou com o rebaixamento médio de 20 cm observado nos piezômetros instalados no contato solo/rocha. Por interceptar fraturas de baixa produtividade, o poço apresentou vazão de cerca de 30 l/h. Por fim foi avaliada a condutividade hidráulica nos horizontes de solo residual por meio da execução de ensaios de infiltração em piezômetros instalados ao longo do traçado. Os resultados indicam que os solos residuais maduro e jovem apresentam maiores valores de condutividade (10^{-4} cm/s a 10^{-5} cm/s) seguidos pelo saprólito (10^{-4} cm/s a 10^{-6} cm/s). Os valores mais baixos foram obtidos para os solos eluviais. Estes valores contribuem significativamente com o meio técnico-acadêmico pois há poucos resultados de condutividade hidráulica para estes solos.

Palavras-chave: aquíferos fraturados, perfilagem óptica, aquífero residual, ensaio de perda d'água sob pressão, geologia estrutural.

ABSTRACT

The geological materials surrounding the tunnels are effectively building materials, because all underground excavations interact permanently with the adjacent geological material, requiring extensive knowledge of the geology in order to scale how take place this interaction, both in the design stage as in the execution phase. The success of an underground work must depend on the knowledge of the characteristics of the rocks and their discontinuities. In the study area is developing the project of building a new subway line whose excavation will have significant interaction with the massive granitic rocks and gneiss located near an important area of geological faulting, which significantly influence the distribution and fracture events. One of the aspects related to fractured bedrock is the hydrogeological behaviour of its discontinuities, which can intensify the weathering processes, causing the loss of geomechanical conditions. This study began with the conducting probing, geophysical tests and petrography. The bedrock has very irregular and conditioned by geological faulting. The predominant rock is granite gneiss with mylonitic gneisses occurrences close to fault. Then we evaluated the application of optic televiewer for structural mass analysis with the characterization of the groups most at risk of fracture, as well as the identification of discontinuities with the potential for the occurrence of groundwater flow through the systematic observation of images of OTV and rock samples, looking for features such as opening, oxidation surfaces and weathering. Structural analysis identified eight groups of fractures in the bedrock. The low angle dip fractures (group 1) and NE-SW fracture high to medium (groups 2 and 3) are the most frequent. NW-SE fractures with high to medium dip (groups 4 and 4a) are also significant occurrence. The low DK fracture dip medium (group 5) and angle NS and EW structures (groups 6 and 7) were found in smaller quantity. The group is represented by 8 NE fractures, with the average low dip. The hydraulic experiments showed that the groups 5 and 3 are those that have larger permeabilities, followed by low dip fractures (group 1). Group 2, which takes place parallel to the regional foliation, presented the smallest proportion. Later was drilled and installed a pumping well in fractured massive, intercepting fourth group structures. The pump test was conducted order to evaluate the connection between the fracture and the residual aquifers. This connection is confirmed with the average drawdown of 20 cm observed in piezometers installed in contact soil / rock. By intercepting low productivity fractures, the well introduced flow of about 30 l / h. Finally we evaluated the hydraulic conductivity in the horizons of residual soil by running infiltration tests in piezometers installed along the route. The results indicate that mature young residual soils have higher conductivity values (10^{-4} cm / sec to 10^{-5} cm / s) followed by saprolite (10^{-4} cm / s to 10^{-6} cm / s). The lowest values were obtained for the eluvial soils. These values contribute significantly to the technical and academic as there are few results of hydraulic conductivity for these soils.

ÍNDICE

RESUMO	2
ABSTRACT	3
LISTA DE FIGURAS.....	6
LISTA DE TABELAS	8
1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVOS.....	11
3. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	12
4. ASPECTOS DO MEIO FÍSICO	13
4.1. EMBASAMENTO PRÉ-CAMBRIANO NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.....	13
4.2. GEOLOGIA ESTRUTURAL DA BACIA DE SÃO PAULO E SEU EMBASAMENTO	16
5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
5.1. MECANISMOS DE FORMAÇÃO DE FRATURAS	23
5.2. NEOTECTÔNICA.....	25
5.3. HIDROGEOLOGIA DE SOLOS RESIDUAIS.....	25
5.4. PERFILAGEM ÓPTICA E ENSAIOS DE PERDA DE ÁGUA NA INVESTIGAÇÃO DE MACIÇOS FRATURADOS.....	26
5.4.1 – <i>Perfilagem Óptica</i>	26
5.4.2 – <i>Ensaio de perda de água sob pressão</i>	28
6. MÉTODOS	32
6.1. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DE DETALHE	32
6.1.1. <i>Levantamento Geofísico de Superfície</i>	32
6.1.2. <i>Execução de sondagens de reconhecimento e piezômetros para caracterização geológica e hidrogeológica</i>	33
6.2. PERFILAGEM ÓPTICA	39
6.2.1. <i>Rugosidade</i>	39
6.2.2. <i>Abertura Aparente</i>	40
6.2.3. <i>Preenchimento, Percolação de Água e Alteração das Paredes Adjacentes</i>	41
6.3. TRATAMENTO DOS DADOS ESTRUTURAIS	41
6.4. ENSAIOS DE PERDA DE ÁGUA SOB PRESSÃO	42
6.5. ENSAIO DE BOMBEAMENTO DO MEIO FRATURADO COM MONITORAMENTO DO SOLO RESIDUAL.	43

7. RESULTADOS	45
7.1. GEOLOGIA LOCAL.....	45
7.1.1. <i>Modelo para descrição de estruturas associadas ao fluxo de água subterrânea ..</i>	<i>69</i>
7.1.2. <i>Feições indicativas de fluxo de água subterrânea e grupos de fraturas associados</i>	<i>84</i>
7.2. ENSAIOS DE PERDA DE ÁGUA SOB PRESSÃO	85
7.3. ENSAIO DE BOMBEAMENTO EM POÇO EM ROCHA.....	93
7.4 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NO SOLO RESIDUAL	99
8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	102
9. BIBLIOGRAFIA	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo dentro da RMSP.	12
Figura 2 - Mapa geológico da Região Metropolitana de São Paulo. Fonte: CPRM (2006)....	14
Figura 3 - Esboços paleotectônicos da evolução do segmento central do RCSB	18
Figura 4 - Direções principais de condutividades hidráulicas máximas, representadas em diagrama polar. Fonte: IPT (1997a).	20
Figura 5 - Círculo de Mohr indicando as condições de formação de fraturas extensionais, híbridas e de cisalhamento. Fonte: Price & Cosgrove (1990), modificado de Fiume (2013). 24	
Figura 6 - Processo de abertura de imagens da perfilagem e cálculo da atitude de estruturas. Fonte: Williams & Johnson (2004).	27
Figura 7 - Configuração dos equipamentos para o ensaio de perda de água sob pressão. Fonte: ABGE, 1975.	28
Figura 8 – Perfil de alteração típico. Fonte: Deere & Patton (1971), apud Rocha (2004).....	33
Figura 9 - Perfil construtivo de piezômetros conforme a especificação de serviços do Metrô-SP. Fonte: CMSP (1981).....	38
Figura 10 – Exemplos de delimitação de rugosidade em imagens de perfilagem óptica. A: descontinuidade rugosa e B: descontinuidade lisa. Fonte: CMSP (2013b) e Oliveira et al. (2013).	40
Figura 11 – Padrões de distribuição de fraturas. A: Aleatória, B: Regular, C: Regular Variada e D: Regular Concentrada. Fonte: Pino (2012).....	42
Figura 12 - Representação do poço GRU-001.....	44
Figura 13 - Seção geológica ao longo da área de estudo com base em sondagens e levantamentos geofísicos.....	46
Figura 14 - Linhas de levantamentos geofísicas realizadas longitudinal e perpendicularmente à Av. Guarulhos.....	47
Figura 15 - Linha sísmica L14a3 – Avenida Guarulhos. Fonte: EEG (2013).	48
Figura 16 - Linha sísmica L14a4 – Avenida Guarulhos. Fonte: EEG (2013).	48
Figura 17 - Linha sísmica L14b2 – Avenida Guarulhos. Fonte: EEG (2013).	49
Figura 18 - Linha sísmica L15c – Rua Joaquim I. da Silva. Notar estrutura NE-SW interpretada como falha geológica. Fonte: EEG (2013).	49
Figura 19 - Linha sísmica L15d. Fonte EEG (2013).	50
Figura 20 - Linha sísmica L15e – Rua Anna da Silva. Fonte: EEG (2013).	50
Figura 21 - Fotomicrografia de lâminas da sondagem 5631, litotipo granito-gnáissico, Estação Ponte Grande. Nicóis cruzados, ampliação de 10 x. Fonte: arquivo técnico da CMSP.	51
Figura 22 - Mapa geológico de pontos de sondagens e perfilagens ópticas.	53
Figura 23 - Representação das estruturas dos grupos 1 e 2.....	54
Figura 24 - Representação das estruturas dos grupos 3, 4 e 4a.	54
Figura 25 - Representação das estruturas dos grupos 5, 6, 7 e 8.	54
Figura 26 - Estereograma da sondagem 5718 com a correção de Terzaghi (1965).	61
Figura 27 - Estereograma da sondagem 5716 com a correção de Terzaghi (1965).	61
Figura 28 - Estereograma da sondagem 5745 com a correção de Terzaghi (1965).	62
Figura 29 - Estereograma da sondagem 5691 com a correção de Terzaghi (1965).	62
Figura 30 - Estereograma da sondagem 5678 com a correção de Terzaghi (1965).	63
Figura 31 - Estereograma da sondagem 5677 com a correção de Terzaghi (1965).	63
Figura 32 - Estereograma da sondagem 5675 com a correção de Terzaghi (1965).	64
Figura 33 - Estereograma da sondagem 5674 com a correção de Terzaghi (1965).	64
Figura 34 - Estereograma da sondagem 5638 com a correção de Terzaghi (1965).	65
Figura 35 - Estereograma da sondagem 5637 com a correção de Terzaghi (1965).	65
Figura 36 - Estereograma da sondagem 5672 com a correção de Terzaghi (1965).	66
Figura 37 - Estereograma da sondagem 5631 com a correção de Terzaghi (1965).	66

Figura 38 - Estereograma da sondagem 5665 com a correção de Terzaghi (1965).	67
Figura 39 - Estereograma da sondagem 5624 com a correção de Terzaghi (1965).	67
Figura 40 - Estereograma da sondagem 5662 com a correção de Terzaghi (1965).	68
Figura 41 - Estereograma da sondagem 5621 com a correção de Terzaghi (1965).	68
Figura 42 - Estereograma para o conjunto de estruturas com permeabilidade de 10^{-4} cm/s.89	
Figura 43 - Estereograma para os conjuntos de estruturas com permeabilidade de 10^{-5} cm/s.	89
Figura 44 - Estereograma para os conjuntos de estruturas com permeabilidade de 10^{-6} cm/s.	90
Figura 45 - Estereograma para os conjuntos de estruturas com permeabilidade de 10^{-7} cm/s.	90
Figura 46 - Distribuição dos ensaios realizados para cada grupo de estruturas	92
Figura 47 - Perfilagem óptica da sondagem do poço de bombeamento GRU-001 com a presença de estruturas com evidência de fluxo de água entre 16,0 e 18,0 m e estrutura em fratura de veio entre 27,5 m e 28,5 m.	93
Figura 48 - Estereograma para as fraturas observadas no poço GRU-001.....	94
Figura 49 - Caixas de testemunhos da perfuração do furo guia do poço GRU-001	94
Figura 50 - Estruturas com evidência de fluxo de água no poço GRU-001.	95
Figura 51 – Rede de monitoramento ao redor do poço GRU-001. Os poços em vermelho representam distância de até 5 m do poço de bombeamento; os poços em laranja representam distância de até 10 m e os poços em amarelo representam distância de até 20 m.	95
Figura 52 - Vazões médias obtidas no bombeamento do poço GRU-001.....	96
Figura 53 - Evolução do NA nos piezômetros posicionados até 5 m de distância.....	97
Figura 54 - Evolução do NA nos piezômetros posicionados a 10 m de distância.....	97
Figura 55 - Evolução do NA nos piezômetros posicionados entre 15 e 20 m de distância. ..	98
Figura 56 - Evolução do NA no poço de bombeamento durante a recuperação.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de perfil de alteração utilizado no Metrô-SP. Fonte: Modificado de Rocha (2004).....	34
Tabela 2 –Classificação do grau de alteração para amostras de sondagens rotativas. Fonte: CMSP (2013a).....	35
Tabela 3 –Classificação do grau de alteração para amostras de sondagens rotativas. Fonte: CMSP (2013a).....	36
Tabela 4 –Classificação do grau de fraturamento para amostras de sondagens rotativas. Fonte: CMSP (2013a).	36
Tabela 5 - Resultados da petrografia em amostras da sondagem 5631, litotipo granito-gnáissico, Estação Ponte Grande. Fonte: Arquivo Técnico da CMSP.....	52
Tabela 6 - Caracterização das estruturas do grupo 1.	55
Tabela 7 - Caracterização das estruturas do grupo 2.	56
Tabela 8 - Caracterização das estruturas do grupo 3.	56
Tabela 9 - Caracterização das estruturas do grupo 4.	57
Tabela 10 - Caracterização das estruturas do grupo 4a.	58
Tabela 11 - Caracterização das estruturas do grupo 5.	58
Tabela 12 - Caracterização das estruturas do grupo 6.	59
Tabela 13 - Caracterização das estruturas do grupo 7.	59
Tabela 14 - Caracterização das estruturas do grupo 8.	60
Tabela 15 – Quadro resumo dos grupos de fraturas.	60
Tabela 16 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5718. .70	70
Tabela 17 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5716. .72	72
Tabela 18 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5745. .73	73
Tabela 19 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5691. .75	75
Tabela 20 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5678. .76	76
Tabela 21 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5677. .77	77
Tabela 22 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5675. .78	78
Tabela 23 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5674. .79	79
Tabela 24 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5638. .81	81
Tabela 25 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5637. .83	83
Tabela 26 - Resultado dos ensaios de perda de água sob pressão.	86
Tabela 27 - Resumo dos ensaios de perda de água realizados.	92
Tabela 28 - Dados do bombeamento nas primeiras 12 hs	96
Tabela 29 - Valores de condutividade hidráulica para solos eluviais (porosidade intergranular).....	100
Tabela 30 - Valores de condutividade hidráulica para solos residuais maduros (porosidade intergranular).....	100
Tabela 31 - Valores de condutividade hidráulica para solos residuais jovens (dupla porosidade – intergranular e fissural).....	100
Tabela 32 - Valores de condutividade hidráulica para saprólitos (dupla porosidade – intergranular e fissural, com maior influência da última).....	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABGE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

CMSP – COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS

ISRM – INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS

RMSP – REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

SPT – STANDARD PENETRATION TEST

VSE – POÇO DE VENTILAÇÃO E SAÍDA DE EMERGÊNCIA

1. INTRODUÇÃO

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) é o maior aglomerado urbano do Brasil e um dos maiores do mundo. Segundo Abreu (1992), a área urbana se desenvolveu a partir de aglomerado quinhentista que ocupava conjunto de colinas e ladeiras no interflúvio Tamanduateí – Anhangabaú, áreas estas constituídas por sedimentos paleógenos consolidados, muito favoráveis para a ocupação.

A área urbana teve crescimento lento até o final da primeira guerra mundial, quando o processo de industrialização passou a provocar significativo aumento populacional que refletiu na maior ocupação em área, porém ainda condicionada aos limites da bacia sedimentar de São Paulo. A partir da década de 1970 o crescimento foi expressivo, principalmente em virtude do milagre econômico proveniente da maciça entrada de capital estrangeiro. Neste contexto, Rocha (1995) menciona que a urbanização ultrapassou a bacia sedimentar de forma progressiva e passou a incorporar terrenos pré-cambrianos de características bastante distintas dos sedimentos da bacia.

A expansão populacional para os terrenos pré-cambrianos, ao redor da bacia sedimentar de São Paulo, passou a exigir maior conhecimento acerca das rochas e seus produtos de alteração principalmente para a sua aplicação em obras de engenharia.

Juliani (1992) menciona que foram produzidos muitos trabalhos sobre o embasamento pré-cambriano da Região Metropolitana de São Paulo e arredores, especialmente após 1980, quando o assunto foi abordado na mesa redonda “Aspectos Geológicos e Geotécnicos da Bacia Sedimentar de São Paulo”, organizada pela ABGE (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental) e pelo núcleo de São Paulo da SBG (Sociedade Brasileira de Geologia), e com a publicação do livro Solos da Cidade de São Paulo, organizado pela ABMS (Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica).

Ainda assim, grande parte deste conhecimento foi obtida a partir de estudos desenvolvidos ao redor da cidade de São Paulo, pois as características geológicas e geomorfológicas da bacia sedimentar dificultam a existência de exposições de rochas em seu interior, uma vez que grande parte do embasamento é sobreposto pelos sedimentos paleógenos e por manto de intemperismo que pode alcançar espessuras superiores a vinte metros (Kutner & Bjornberg, 1997).

A construção sistemática de túneis dentro da bacia sedimentar de São Paulo passou a interceptar rochas do seu embasamento, ainda pouco conhecido, tendo como uma das principais bases geológicas os trabalhos de Coutinho (1972 e 1980), desenvolvidos nas décadas de 1950 e 1960, e publicados mais tarde.

Dentre os aspectos de grande importância para a construção de túneis, as características hidrogeológicas dos maciços fraturados representam um grande desafio. A execução de obras subterrâneas exige elevado grau de conhecimento do comportamento geotécnico do maciço, este significativamente condicionado pelas características hidrogeológicas.

A área de estudo está inserida em um grande projeto de ampliação de um dos principais ramais do sistema metro-ferroviário paulistano. Uma linha que escavará um maciço ainda pouco estudado e inserido em uma região sob influência de importantes eventos geotectônicos. Diante deste contexto, considera-se fundamental aprofundar o conhecimento sobre os diversos parâmetros destas rochas do embasamento pré-cambriano.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi identificar as zonas mais permeáveis de um maciço fraturado e correlacionar estes comportamentos com os padrões das discontinuidades presentes, visando à obtenção de informações para subsidiar o projeto de escavação de uma linha metroviária na Região Metropolitana de São Paulo. Os objetivos específicos foram:

- Analisar a geologia estrutural do maciço, identificando e caracterizando os principais grupos de fraturas e sua forma de ocorrência;
- Identificar quais grupos de fraturas apresentam feições associadas à ocorrência de fluxo de água subterrânea e como estas feições se manifestam no maciço;
- Avaliar a aplicação da perfilagem óptica para a caracterização de feições associadas ao fluxo de água subterrânea em maciços fraturados, bem como para a seleção de pontos para a realização de ensaios hidráulicos;
- Realizar ensaio de bombeamento para identificar se há conexão hidráulica entre um aquífero fraturado e um aquífero de solo residual;
- Obter dados de condutividade hidráulica de solos residuais em um maciço pouco estudado e compará-los com os diferentes graus de alteração destes solos.

3. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende um trecho do traçado da expansão da Linha 2 – Verde do Metrô de São Paulo, que ligará as regiões sul/sudeste e leste do município de São Paulo ao município de Guarulhos.

A região onde ocorre maior interação das obras com maciço do embasamento é o trecho entre as estações Tiquatira e Dutra, onde o trecho se desenvolve desde o município de São Paulo, cruzando o Rio Tietê e o Rio Cabuçú (junto à Avenida Educador Paulo Freire) – onde entra nos limites do município de Guarulhos, atravessando o bairro de Ponte Grande, onde se alinha com a Avenida Guarulhos, até chegar à Rodovia Presidente Dutra (Figura 1).

O acesso à área é feito pela Rodovia Presidente Dutra, na saída para o Internacional Shopping Guarulhos - situado no Km 225, de onde pode ser acessada a Avenida Guarulhos até o bairro de Ponte Grande, município de Guarulhos.

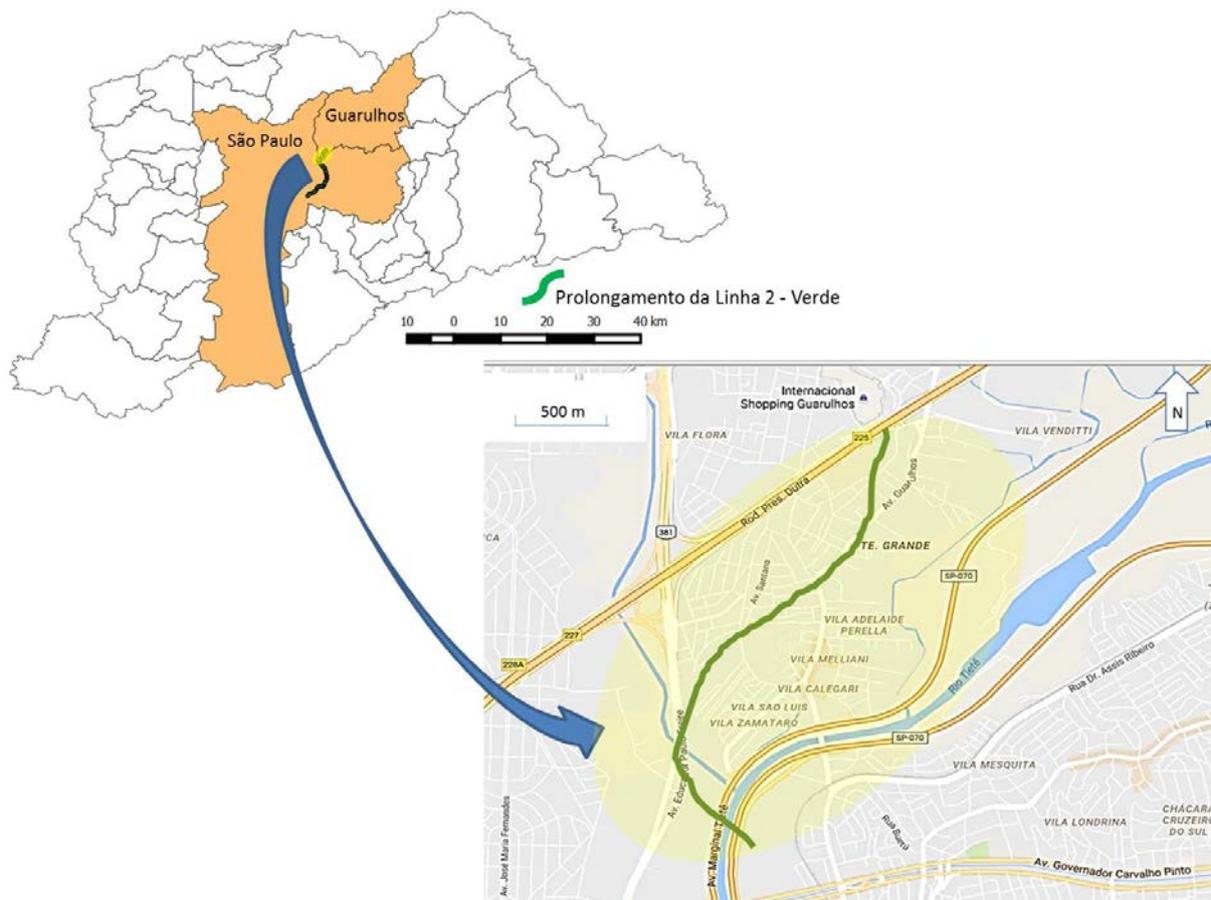


Figura 1 - Localização da área de estudo dentro da RMSP.

4. ASPECTOS DO MEIO FÍSICO

4.1. EMBASAMENTO PRÉ-CAMBRIANO NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

O embasamento da região metropolitana de São Paulo faz parte da Província Mantiqueira (Almeida *et al.*, 1977), unidade decorrente da orogenia neoproterozóica, Brasileiro - Panafricana, que resultou na formação do Paleocontinente Gondwana Ocidental, e consiste em sistema orogênico que engloba os orógenos Araçuaí, Ribeira, Brasília Meridional, Dom Feliciano e São Gabriel (Heilbron *et al.*, 2004). Entre essa zona (a sul) e a borda norte do maciço cratônico de Luís Alves, estão presentes os terrenos Apiaí, Guaxupé e Embu (Campos Neto, 2000).

Neste contexto, segundo Campos Neto (2000), a geologia das rochas cristalinas da Região Metropolitana de São Paulo é composta por rochas do Terreno Apiaí, Terreno Embu e da *Nappe* Socorro-Guaxupé. A estruturação regional NNE-SSW observada na RMSP é condicionada por sistema de falhas transcorrentes (Hasui *et al.* 1975). A faixa formada pelas falhas de Taxaquara e Jaguarí delimita a norte a bacia sedimentar de São Paulo, que apresenta, ao sul, contato irregular com seu embasamento; a leste e oeste, os limites são condicionados por elevações do embasamento (Cozzolino, 1996).

As falhas de Taxaquara e de Caucaia, que fazem parte do sistema de falhas transcorrentes supracitado, são responsáveis por feições importantes da geologia da RMSP. Na altura do Rio Tietê ocorre a Falha de Taxaquara, a norte da qual estão as rochas do Terreno Apiaí, representado pelos grupos São Roque e Serra do Itaberaba, intrudidos por corpos graníticos. A sul da Falha Caucaia ocorrem terrenos geológicos distintos associados à Faixa Ribeira; estes são o Terreno Embu e, a sul da Falha de Cubatão, o Terreno Serra do Mar, ambos intrudidos por vários corpos graníticos neoproterozóicos (Figura 2).

Estes sistemas de falhas transcorrentes relacionam-se com tectônica de escape ou cinturões transpressivos. São os sistemas Transamazônico, Piranhas, Campo do Meio, Dorsal do Canguçu e Paraíba do Sul, este último corresponde ao sistema onde está inserida a RMSP. As lineações de estiramento do orógeno Ribeira possuem direções em torno de NE-SW, coerentes com o sistema transcorrente Paraíba do Sul, e indicam a direção do transporte de massas e sentido de movimento, que coincide com a polaridade metamórfica, sentido para o qual o metamorfismo regional decresce (Hasui, 2010).

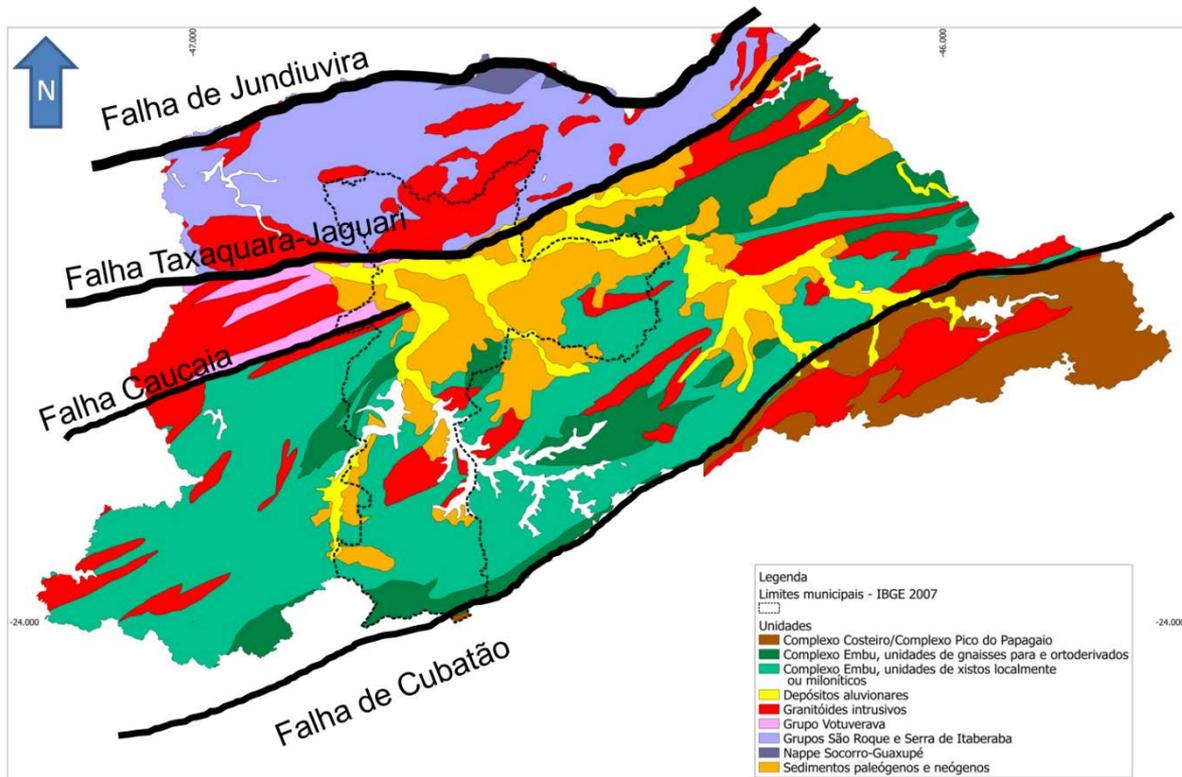


Figura 2 - Mapa geológico da Região Metropolitana de São Paulo. Fonte: CPRM (2006).

O Terreno Embu ocorre na porção central da RMSP, ocupando faixa de afloramentos com direção NE-SW, formado por xistos, filitos, migmatitos, gnaisses migmatitizados e corpos lenticulares de quartzitos, anfibolitos e rochas calciossilicatadas. É limitado ao norte pelo sistema de falhas de Taxaquara e do Rio Jaguari e ao sul pela falha de Cubatão, separando-o dos grupos São Roque e Serra do Itaberaba, e Terreno Serra do Mar, respectivamente.

Segundo Juliani (1992), o Complexo Embu é composto basicamente por três conjuntos de litotipos:

- Rochas ortognáissicas polimigmatizadas e polideformadas que constituem o Complexo Granito-Gnáissico-Migmatítico. Estes constituem o embasamento das supracrustais, com idades preliminares arqueanas a paleoproterozóica. Na RMSP, Hasui (1994) aponta a unidade como um conjunto de gnaisses de tipos diversos (porfiróides e homogêneos predominantes, bandados, subordinados e por vezes laminados), que se apresentam moderadamente migmatitizados (sob a forma de estruturas bandadas ou estromatíticas) e possuem enclaves esparsos e restritos de rochas metassedimentares e anfibolitos.
- Rochas metassedimentares em grau metamórfico elevado, incluindo gnaisses com extensas faixas de xistos da fácies anfibolito médio a superior. Estes correspondem

ao Complexo Embu de Fernandes (1991). Na RMSP, Hasui (1994) aponta a ocorrência de metassedimentos de fácies anfibolito, representados por micaxistos, quartzitos e rochas cálcio-silicáticas, com anfibolitos associados. Estas se apresentam moderadamente migmatizadas com estruturas bandadas ou estromatíticas.

- Sericita xistos e filitos de baixo grau metamórfico, caracterizados por Vieira (1989), que podem corresponder a porções das rochas metassedimentares supracitadas, que sofreram metamorfismo em condições de temperaturas mais baixas.

Segundo CPRM (2006), determinações geocronológicas foram realizadas por Cordani *et al.* (2002) em biotita gnaisses granodioríticos a tonalíticos, intercalados na unidade de xistos, localmente migmatíticos, próximos a São Lourenço da Serra. Uma idade de 811 ± 13 Ma obtida pelo método U-Pb SHRIMP é relacionada à cristalização magmática do protólito granodiorítico-tonalítico. A partir de datações pelo método Th-U-Pb, em microsonda eletrônica, monazitas extraídas de granada-sillimanita-biotita gnaisses da unidade paragnáissica e unidade de xistos, localmente migmatíticos, forneceram idades de 787 ± 18 Ma e 797 ± 17 Ma, respectivamente, que correspondem à idade do metamorfismo principal (Vlach 2001). Pelo mesmo método, o autor obteve idade de 594 ± 21 Ma na unidade paragnáissica, compatível com a colocação dos maciços graníticos tardios e com o metamorfismo principal do Terreno Serra do Mar de Campos Neto (2000). Idades aparentes em torno de 560 Ma, obtidas pelo método Rb-Sr, em pares feldspato e rocha total, por Cordani *et al.* (2002), são interpretadas como o final do metamorfismo regional e deformação dúctil.

Associados ao Complexo Embu há uma grande quantidade de batólitos a pequenos stocks de granitóides que afloram na RMSP e em suas áreas adjacentes, com alguns parcialmente recobertos pelos sedimentos da Bacia de São Paulo. A maior resistência relativa ao intemperismo fez com que estas rochas sustentem altos morfológicos, que, de modo geral, não foram cobertos pelos sedimentos (Coutinho 1980, *apud* Juliani 1992).

Segundo Hasui *et al.* (1978), estes corpos são sin-tectônicos ou pós-tectônicos aos terrenos metamórficos adjacentes. Hasui (1994) classifica estas rochas como granitóides de tipos homogêneos e porfiróides, finos a muito grossos, de cores cinza-claro a cinza-escuro e avermelhados.

Juliani (1992) menciona que a composição mineralógica dessas rochas varia de tonalítica a granítica, de acordo com Hasui *et al.* (1978), e é mais restrita, de granodiorítica a granítica, segundo Janasi & Ulbrich (1991). As rochas em geral apresentam-se fracamente foliadas internamente aos maciços e com bordas sempre associadas a zonas de falhas. Biotita é o máfico principal e hornblenda é subordinada. Também é registrada a ocorrência

de granitos como pequenos stocks peraluminosos. Inúmeros plútons isolados devem constituir satélites dessas grandes massas graníticas, tendo em vista as semelhanças composicionais e de idade (Janasi & Ulbrich 1991).

Estes granitóides apresentam, em sua maioria, tendência cálcio-alcálica potássica, predominando as composições monzogranítica, granodiorítica, monzodiorítica e diorítica (CPRM, 2006).

Estes granitos intrusivos foram diferenciados por Fernandes (1991), que identificou três grupos, separados por características geoquímicas e deformacionais. Um grupo de granitóides pré-metamórficos (gnáissicos), que possuem a primeira foliação do Complexo Embu bem como a foliação regional, e outros dois grupos geocronologicamente mais jovens, sendo um representado por granitos gnáissicos encaixados na zona de cisalhamento de Cubatão, e outro sin-tectônico a pós-tectônico.

Os grupos São Roque e Serra do Itaberaba com ocorrências na porção norte da RMSP, são constituídos por rochas metassedimentares e metavulcânicas, representadas por filitos, metarenitos e quartzitos, tendo secundariamente a ocorrência de anfibolitos, metacalcários, dolomitos, xistos porfiroblásticos e rochas calciossilicatadas (Rodríguez 1998). A sul esses grupos entram em contato, através do sistema de falhas de Taxaquara e Jaguari, com o Complexo Embu e, ao norte, através da falha de Jundiuvira, são separados do Terreno Socorro-Guaxupé.

Hasui (1994) aponta na RMSP a ocorrência de metassedimentos de fácies xisto verde, representados por filitos, quartzitos e rochas calciossilicáticas, com metabasitos associados.

Juliani (1992) atribui ao Grupo Serra do Itaberaba o metamorfismo na fácies anfibolito médio a superior de pressão intermediária (tipo Barrowiano). Para o Grupo São Roque, o metamorfismo é na fácies xisto verde de baixa pressão (tipo Abukuma). IPT (1981) admite idade neoproterozóica, em torno de 640 Ma para os granitóides sintectônicos da unidade (Rodríguez, 1998). Segundo Henrique-Pinto & Janasi (2010), a deposição do Grupo São Roque tem sido determinada com maior segurança através de datações U-Pb de rochas metavulcânicas ácidas e básicas que ocorrem intercaladas na Formação Morro Doce (Carneiro *et al.* 1984), com idade de, aproximadamente, 1800 Ma, obtida por Van Schmus *et al.* (1986).

4.2. GEOLOGIA ESTRUTURAL DA BACIA DE SÃO PAULO E SEU EMBASAMENTO

O embasamento da região metropolitana de São Paulo (RMSP) está inserido em um complexo sistema influenciado por várias entidades geotectônicas. Hasui (2010) menciona

que, embora a história geológica regional remonte ao Arqueano (4000 a 2500 Ma) e envolva processos paleoproterozóicos (2500 a 1600 Ma) e mesoproterozóicos (1600 a 1000 Ma) relacionados com a evolução dos supercontinentes Colúmbia e Rodínia, é no Neoproterozóico (1000 a 542 Ma) que incidiram os movimentos de fragmentação e colisão a que se deve a estruturação regional aqui encontrada.

Estes processos colisionais remontam ao grande intervalo existente entre 900 e 500 Ma, período onde as grandes massas continentais da América do Sul, África, Índia, Austrália e Antártida, após a fragmentação do Rodínia, iniciaram um processo de aglutinação por meio de progressivas convergências levando à formação do megacontinente Gondwana. Este processo de aglutinação culminou no fechamento de paleoceanos que existiam entre as massas continentais da América do Sul e da África (oceanos Adamastor, Goiás e Borborema). O fechamento destes paleoceanos ocorreu por meio de um grande evento colisional, com a formação dos sistemas orogênicos Mantiqueira e Tocantins (Hasui, 2010). É importante destacar que, segundo Hasui (2010), os traços estruturais nestes processos colisionais representam uma importante herança que controlou boa parte dos processos geotectônicos posteriores, como a implantação da Bacia do Paraná e a Reativação Sul-Atlântica a que se relacionam ativo magmatismo, rifteamento, morfogênese e a abertura do Atlântico (processo relacionado à formação das Bacias de São Paulo, Taubaté e outras).

No que diz respeito à influência da estruturação do embasamento em relação à deposição dos sedimentos da Bacia de São Paulo, Takiya (1991) mostrou que as zonas de movimentação e falhas principais desenvolveram-se ao longo de planos de foliação e juntas longitudinais das faixas de fraqueza correspondentes à zona de transcorrência dúctil.

Riccomini (1989), com base na análise das estruturas tectônicas e suas relações estratigráficas com o preenchimento sedimentar, elaborou o primeiro modelo tectônico contemplando os tectonismos gerador e modificador para o segmento central do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB), que inclui as Bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda (Figura 3). Concluiu-se que a formação da depressão original do rift e concomitante preenchimento sedimentar e vulcânico teriam ocorrido no paleógeno, sob a ação de um campo de esforços distensivo de direção NNW-SSE, causador da reativação, como falhas normais, de antigas zonas de cisalhamento proterozóicas de direção NE a ENE.

O modelo é sustentado pelo caráter normal das falhas mestras ativas durante a instalação do segmento central do RCSB; pelas direções de distensão obtidas a partir dos dados de falhas estriadas, sempre em posição ortogonal às falhas de borda das bacias; e também pela contigüidade entre os depósitos de leques aluviais proximais e as áreas fontes vizinhas.

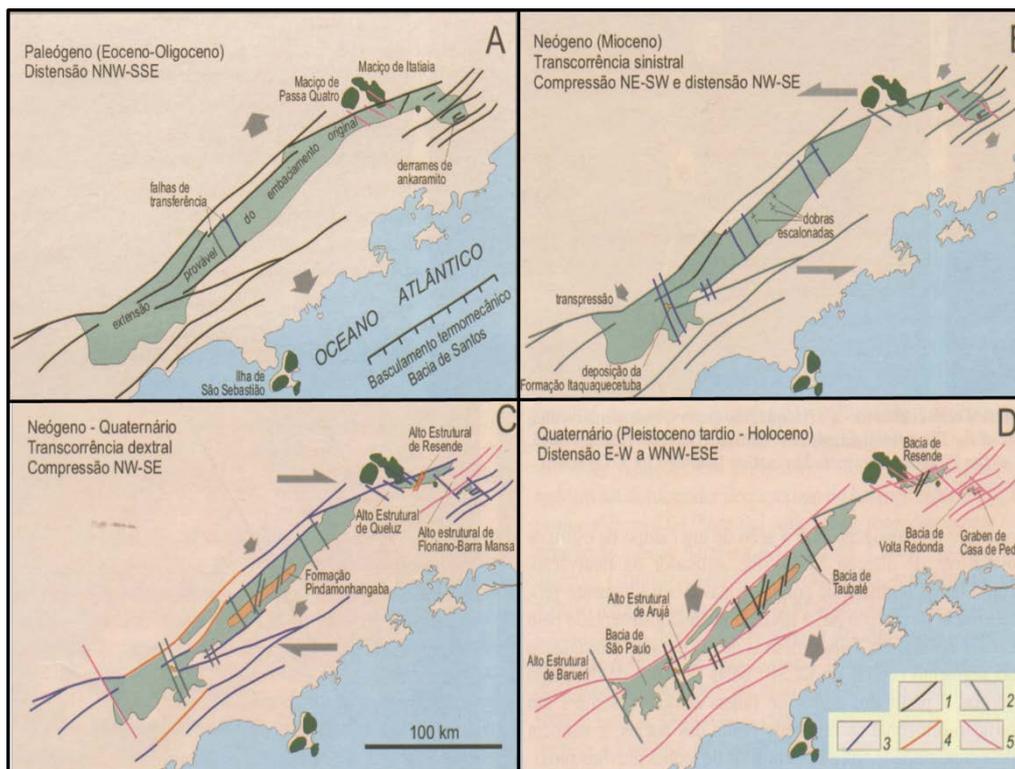


Figura 3 - Esboços paleotectônicos da evolução do segmento central do RGSB

Legenda no quadro D: 1) falhas de componente predominante normal; 2) falha de componente transcorrente sinistral; 3) falha de componente transcorrente dextral; 4) falha de componente predominante reversa; 5) falha com movimentação não caracterizada. Fonte: Riccomini *et al.* (2004).

Estudos realizados em rochas do substrato do RGSB identificaram a atuação de um regime transcorrente sinistral, com compressão de direção NE-SW e distensão NW-SE, afetando corpos alcalinos neocretáceos, no sul do Estado de São Paulo (Riccomini, 1995) e na região do Gráben da Guanabara (Ferrari, 2001), com idade neocretácea a paleocena.

Segundo Riccomini (1989) e Salvador & Riccomini (1995) as fases tectônicas deformadoras envolveriam novas reativações ao longo das falhas preexistentes e, em menor escala, geração de novas estruturas. Os eventos deformadores compreenderiam, sucessivamente: 1) transcorrência sinistral de direção E-W, com distensão NW-SE e, localmente, compressão NE-SW, de idade neogênica; 2) transcorrência dextral, com compressão NW-SE, de idade quaternária; 3) distensão de direção WNW-ESE e idade pleistocênica a holocena; e 4) Compressão E-W, de idade holocena.

Ao primeiro evento deformador estão relacionadas falhas transcorrentes ou de empurrão, estas por vezes colocando blocos de rochas do embasamento sobre os depósitos sedimentares e aquelas controlando a instalação de bacias de afastamento de pequenas

dimensões - Formação Itaquaquetuba na sua área-tipo (Riccomini, 1989). Este evento foi também o responsável pela geração de dobras cônicas quilométricas na porção central da Bacia de Taubaté.

Durante o segundo evento deformador as falhas das bordas das bacias, ativas na fase de instalação do rift, foram reativadas com caráter transcorrente, inverso e/ou de empurrão, localmente cavalgando depósitos sedimentares paleogênicos. Neste evento teriam sido afeiçãoados os altos estruturais que atualmente separam o registro sedimentar paleogênico em bacias isoladas.

O terceiro evento deformador, de caráter distensivo, parece ter dado o contorno atual da distribuição dos sedimentos. O último evento deformador, compressivo, causou a reativação inversa de falhas de direções próximas de N-S e a geração de famílias de juntas conjugadas de cisalhamento em depósitos colúvio-aluviais.

As variações nos campos de esforços relacionados ao tectonismo deformador decorreriam do balanço entre o *ridgepush* e *slab-pull* da Placa Sul Americana, respectivamente em relação às placas Africana e de Nazca (Riccomini *et al*, 2004). Considerando-se as direções estruturais preferenciais do RCSB, segundo NE, em relação à trajetória da Placa Sul Americana, para W, ocorreria transcorrência dextral e compressão (transpressão) quando o *ridge-push* superasse o *slab-pull*, e transcorrência sinistral e distensão (transtração) no caso oposto (Riccomini, 1989). Há ainda outros fatores, tais como a carga de sedimentos na Bacia de Santos, a presença de soerguimentos regionais e a ascensão do nível do mar após a glaciação do pleistoceno terminal provavelmente interferiram no balanço dos esforços envolvidos.

Fiume (2013), em estudo na região do canal de Jurubatuba, município de São Paulo identificou os principais grupos de fraturas atuantes no Terreno Embu nesta região. Os grupos observados foram NW a NNW, sub-vertical; E-W a ENE, sub-vertical; NE, sub-vertical; E-W a WNW, com mergulhos intermediários e NNE a NE de baixo mergulho.

Oliveira (2015) obteve uma grande quantidade de dados de fraturas no Terreno Embu, na região de Taboão da Serra, correlacionando-as com as identificadas no trabalho de Hasui (1994). Ambos os trabalhos indicaram a marcante estruturação regional NE-SW na RMSP. A grande discordância entre os trabalhos diz respeito à foliação regional observada. Hasui (1994) apontou a ocorrência desta como de alto ângulo, enquanto Oliveira, com base em dados obtidos com perfilagem óptica, indicou esta como de mergulho intermediário.

Com relação às estruturas com potencial de fluxo de água subterrânea, Fiume (2013) aponta que as de direção NNE a NE, de baixo ou médio ângulo, são as de maior importância, seguidas das estruturas de alto ângulo, que promovem a comunicação entre as anteriores.

IPT (1997a), em estudo para a CMSP realizado na Marginal do Rio Pinheiros, indica

que as condutividades hidráulicas máximas (K_{max}) apresentam, em cerca de 80% dos casos analisados, direção NNW e baixo mergulho ($< 33^\circ$). Os casos de altos mergulhos (51° a 86°) restringiram-se exclusivamente à escala 3-6-7-8 (Figura 4). No caso das condutividades hidráulicas mínimas (K_{min}) observou-se uma tendência deste se posicionar na direção ENE. Cerca de 50% dos tensores apresentam alto ângulo de mergulho (50° a 70°), outros 30% dos casos o mergulho situa-se entre 20° a 30° , e em cerca de 15% dos resultados, os tensores apresentam a direção principal menor (K_{min}), com inclinação subhorizontal (2° a 14°).

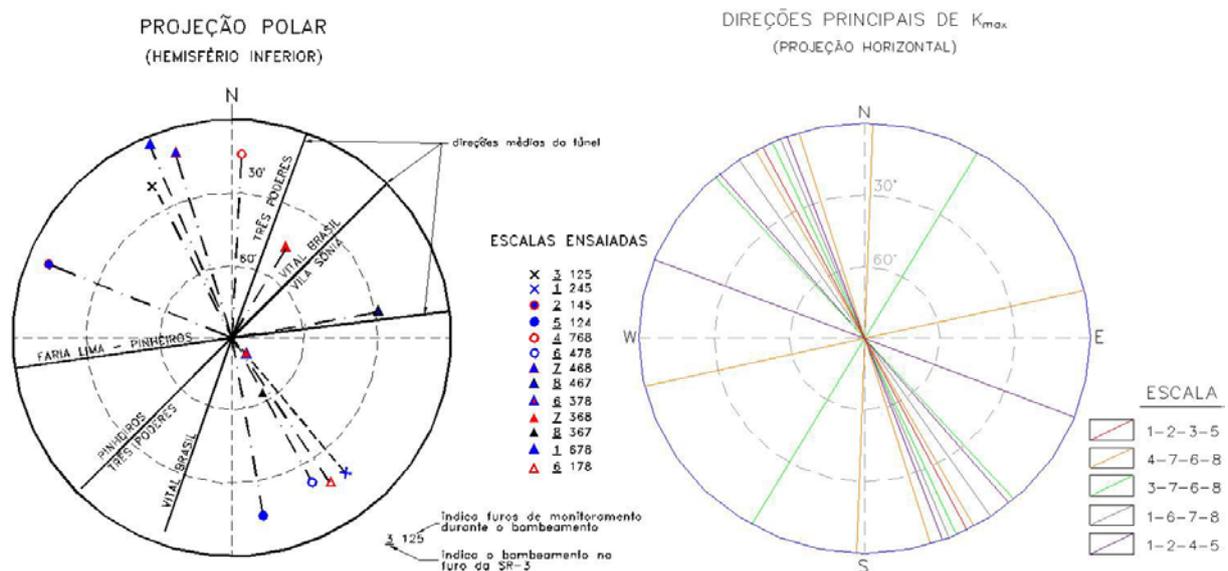


Figura 4 - Direções principais de condutividades hidráulicas máximas, representadas em diagrama polar. Fonte: IPT (1997a).

5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nas rochas são de baixa porosidade primária, como aquelas situadas na área de estudo, o fluxo da água subterrânea é condicionado pelas fraturas da rocha. Portanto as fraturas constituem a chamada porosidade secundária e a eficiência do aquífero com relação ao fluxo da água dependerá essencialmente da densidade, conectividade e abertura das fraturas presentes.

Nesse tipo de aquífero, denominado fraturado, o entendimento do fluxo de água subterrânea é uma tarefa complexa, pois os parâmetros geométricos das fraturas (p.ex., abertura, comprimento, densidade) são muito variáveis e os pontos de observação podem não ser representativos, quando comparamos diferentes grupos de fraturas, ou mesmo para uma única fratura. Por esse motivo, a análise do fluxo da água segundo fraturas pode seguir duas abordagens distintas: de meio contínuo ou de meio descontínuo (Fernandes, 2008).

A análise de meio contínuo considera o maciço fraturado como uma grande massa uniforme, equivalente a um maciço de porosidade primária, trata-se, portanto, de uma simplificação, conferindo a todo o meio estudado os mesmos valores de parâmetros hidráulicos (por exemplo, condutividade hidráulica e porosidade). Esta equivale à abordagem do volume elementar representativo de Freeze & Cherry (1979), onde os parâmetros hidráulicos permanecem constantes.

A análise por meio descontínuo foca as investigações na hidráulica do fluxo em fraturas individuais ou zonas de fraturas estreitas (Fernandes, 2008). Neste caso, é imprescindível um trabalho de levantamento estrutural do maciço de grande detalhamento, pois a geometria da zona de fraturamento precisa ser bem caracterizada, com os parâmetros hidráulicos sendo representativos apenas para uma fratura analisada individualmente ou para uma mesma família de fraturas.

A deformação rúptil e a formação de fraturas são condicionadas pela tectônica da região, a qual exerce forte controle na direção, densidade e abertura das fraturas.

Exercem controle sobre o fluxo parâmetros como abertura, densidade, conectividade, rugosidade, comprimento, orientação e preenchimento, sendo que todos estes parâmetros ocorrem em função de agentes como magnitude de esforços, regimes tectônicos, intensidade de deformação, presença de fluidos e litologia.

Com relação a estes parâmetros, a equação denominada de lei cúbica (eq. (1)) demonstra que a abertura da fratura (b) é mais relevante do que a densidade de fraturas (N) na determinação da condutividade hidráulica (K), uma vez que esta é proporcional ao cubo da primeira (Snow, 1968; Domenico & Schwartz, 1990). Como a abertura das fraturas é determinada pelo seu mecanismo de propagação, torna-se necessário investigar e

compreender os campos de esforços atuantes na rocha. Uma forma prática é a aplicação de uma lei derivada da lei cúbica, que utiliza a transmissividade (T) medida em testes hidráulicos para determinar a abertura hidráulica de uma ou mais fraturas interceptadas.

$$k = \frac{\rho \cdot g}{12\mu} \cdot Nb^3 \quad (1)$$

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

onde:

ρ = densidade da água (kg/cm³)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

μ = viscosidade da água (kg/m.s)

b = abertura da fratura em (1) e somatória das aberturas de fraturas em (2)

Uma vez que a existência de fraturas em um maciço rochoso seja necessária para que ocorra passagem de água, seria natural assumir que a densidade de fraturas seja diretamente proporcional à boa produção de água, no entanto, estudos de Gale & Rouleau (1983), Briz-kishore (1993) e Fernandes (2008) mostram que há apenas uma discreta correlação positiva entre densidade e condutividade hidráulica.

A geometria das fraturas é uma importante característica a ser observada; superfícies lisas ou rugosas fazem grande diferença na abertura das fraturas, pois podem até provocar efeito de obstrução ao pleno fluxo da água (no caso da rugosidade).

A orientação das fraturas é outro fator a ser acompanhado de perto, pois contribui com a comunicação entre famílias de fraturas, promovendo o efeito de conectividade, este fundamental para o transporte da água ao longo de maciços rochosos.

A litologia é outro fator determinante para o desenvolvimento da rede de fraturas, por exemplo, o acamamento litológico, típico de rochas sedimentares e de algumas rochas metamórficas, pode levar ao desenvolvimento de sistemas de fraturas limitados-por-estratos (*stratabound*) ou não limitados por estratos (*non-stratabound*) (Odling *et al.*, 1999). Sendo que, no primeiro caso, as fraturas podem ser confinadas a camadas individuais, com tamanhos delimitados pelas camadas e com espaçamento regular. É possível que haja intercalação de tipos litológicos com propriedades mecânicas distintas, que fazem com que a atuação de um único campo de esforços leve à formação de fraturas extensionais, em litologias menos competentes, e de fraturas de cisalhamento, em litologias mais competentes (Gross, 1993).

Também no que tange à influência da litologia, principalmente com relação a compartimentação geológica, Fernandes *et al.* (2005) conseguiu separar agrupamentos de poços em relação a grupos geológicos (estes refletindo aspectos litológicos); foram observados comportamentos hidráulicos diferentes para poços instalados em diferentes litotipos.

Fernandes (2008) menciona que a escala a ser utilizada no estudo do fluxo da água em aquíferos fraturados deve ser bastante analisada. Segundo Odling (1997) a maioria das propriedades das fraturas, como distribuição de comprimentos, densidade, conectividade e natureza das junções, dependem da escala de trabalho. A única propriedade considerada independente é a orientação das famílias de fraturas. Rouleau *et al.* (1996) demonstram que o tipo, origem e geometria das estruturas que influenciam o fluxo no aquífero são diferentes de uma escala para a outra e, conforme Odling *et al.* (1999), tal fator não deve ser desprezado quando forem feitas extrapolações para áreas maiores e modelagem de redes de fraturas.

A utilização de dados provenientes da análise de poços pré-existentes é uma das ferramentas disponíveis mais importantes, pois oferece grande quantidade de informação de maneira não muito onerosa. Para a obtenção de tais dados, faz-se uso de ensaios hidráulicos e da geofísica de poço, através de perfilagens (óptica e acústica). A perfilagem óptica e acústica utilizada em conjunto com as demais técnicas de perfilagem – como de velocidade de fluxo, de temperatura e condutividade da água, calibre e gama – possibilitam a indicação das fraturas individuais ou grupo de fraturas mais condutoras. Tais dados vêm sendo correlacionados com os dados de produção para identificar os principais fatores que influenciam o fluxo em aquíferos fraturados (Fernandes, 2008).

5.1. MECANISMOS DE FORMAÇÃO DE FRATURAS

Segundo Price & Cosgrove (1990), a direção dos esforços é o fator que estabelece o modo de propagação das fraturas, que pode ser extensional (modo I) – relacionadas a um regime extensional de σ_3 ou de cisalhamento (modo II e III) – relacionadas a um regime compressivo de σ_1 .

O modo de propagação extensional ocorre por abertura ou separação normal aos planos de ruptura, sob ação de esforços de tração perpendicular ao plano da fratura, gerando as fraturas extensionais (Figura 5 – Ponto A). O modo de propagação por cisalhamento ocorre por deslizamento paralelo à superfície da fratura, o qual pode ser paralelo à frente de propagação ou perpendicular a esta, e resulta em fraturas de cisalhamento (Figura 5 – Ponto B). Nos casos em que ocorre influência de ambos os

modos de propagação, extensional e cisalhamento, são geradas fraturas híbridas (Figura 5 – Ponto C).

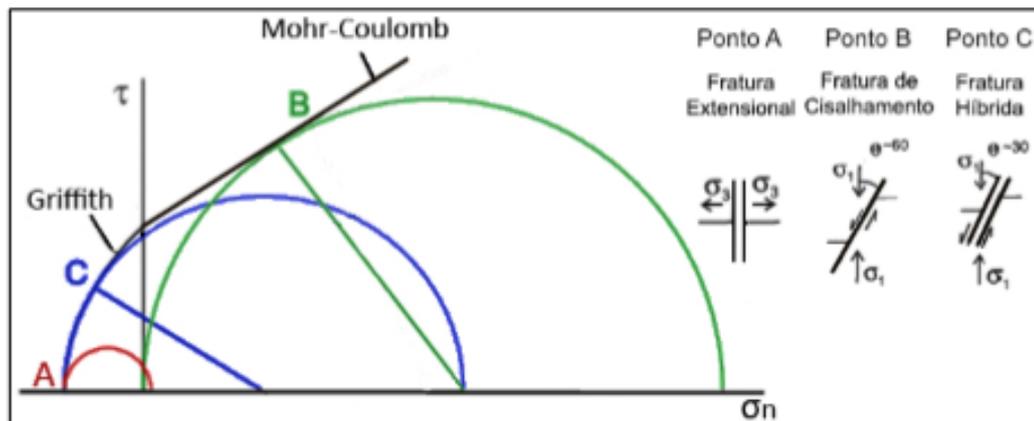


Figura 5 - Círculo de Mohr indicando as condições de formação de fraturas extensionais, híbridas e de cisalhamento. Fonte: Price & Cosgrove (1990), modificado de Fiume (2013).

O conhecimento das condições de fraturamento é essencial para a devida compreensão da hidráulica de maciços fraturados; estudos de Fernandes (1997) e Fernandes & Rudolph (2001) contribuíram para o entendimento de que alguns padrões de fraturas e suas formas de ocorrência são mais favoráveis ao fluxo de água subterrânea.

Segundo Cosgrove (1998), a pressão de fluidos exerce papel significativo no desenvolvimento de fraturas, pois pode acarretar na mudança do estado de tensões de um maciço, favorecendo a formação de novas fraturas. A atuação da pressão de fluidos promove a redução da intensidade dos esforços atuantes. No círculo de Mohr esse fenômeno é observado por meio do seu deslocamento para a esquerda, isso faz com que este toque a envoltória em tensões mais reduzidas; ou seja, a pressão de fluidos consegue fazer com que fraturas se desenvolvam mesmo sob altas tensões de confinamento, gerando tanto fraturas de extensionais como de cisalhamento.

Cosgrove (1998) menciona que a formação das fraturas hidráulicas é determinada pelo esforço diferencial, que pode variar com a profundidade, levando à mudança de formação de fraturas extensionais para de cisalhamento quando a profundidade exceder 4 vezes a resistência à tração.

5.2. NEOTECTÔNICA

O conhecimento da neotectônica é fundamental pois pode indicar quais fraturas encontram-se atualmente abertas, configurando-se assim como caminhos de fluxo preferenciais.

Uma das ferramentas da neotectônica são os mapas de campo de esforços atuais, elaborados por meio de dados de *breakouts* de perfurações que permitem indicar a direção em que atualmente está o SH_{máx} (esforço horizontal máximo).

O estado atual de tensões de um maciço pode promover fechamento e abertura de fraturas já existentes (Barton *et al.*, 1995 e Morin & Savage, 2003), como mencionado em Fernandes (2008).

Fernandes & Mello (2005), Fernandes (1997), Fernandes & Rudolph (2001) e Fernandes *et al.* (2005) trazem importantes contribuições com relação à importância do conhecimento dos eventos tectônicos cenozóicos e sua relação com os grupos de fraturas que podem estar hidraulicamente abertas ou fechadas.

Neste contexto, destaca-se a contribuição de Fernandes & Rudolph (2001) que demonstra a importância do conhecimento dos eventos tectônicos e seus padrões estruturais, que podem ser identificados pela análise de lineamentos, uma vez que estes influenciam a produtividade de poços.

5.3. HIDROGEOLOGIA DE SOLOS RESIDUAIS

Conceitualmente, o manto inconsolidado desempenha um importante papel para a recarga e até proteção do aquífero fraturado e o seu desenvolvimento está diretamente relacionado à evolução tectônica, além do clima e substrato rochoso, fatores que controlam erosão, sedimentação e alteração.

Uma vez que estes apresentam grande heterogeneidade (tanto horizontal, como vertical), é de se esperar que seus parâmetros hidráulicos também reflitam estas condições, com permeabilidades que variam de 10^{-2} a 10^{-8} cm/s, sendo que, mesmo em grandes espessuras, somente 10 a 15% é suficientemente permeável, Cavalcante (1990) e Bertachini (1987).

Corroboram para este cenário os estudos de Briz-Kishore (1993) e Menegasse (1991), que indicam que nos poços que exploram estes aquíferos, a grande contribuição de produção de água parte efetivamente das zonas fraturadas superficiais.

CMSP (2014) nos estudos do Projeto Básico da Fase III da Linha 4, aplicou a metodologia de Hvorslev (1951) para piezômetros instalados na região de Taboão da Serra, São Paulo. A porção de solo residual foi subdividida de acordo com a metodologia do Metrô (adaptação de Kutner & Bjornberg, 1997), em solo residual maduro, solo residual jovem e saprólito. Os resultados de condutividade hidráulica para todos os graus de alteração do solo residual variaram entre 10^{-3} a 10^{-6} cm/s, demonstrando a grande variabilidade de comportamento hidráulico destes solos.

O meio técnico e acadêmico ainda carece de maiores contribuições frente a hidrogeologia em solos residuais da RMSP. Os dados de condutividade hidráulica e demais parâmetros hidráulicos ainda são escassos. O trabalho de Futai *et al.* (2012) presta grande contribuição ao reunir os dados das poucas publicações sobre o tema, relacionando trabalhos que determinaram parâmetros relacionados à permeabilidade de solos residuais da RMSP, tais como ABEF (1989) e Cecílio Júnior (2009) em solos residuais de gnaiss (valores entre 10^{-4} e 10^{-6} cm/s) e Franch (2008) em solo residual de quartzo-micaxisto (10^{-4} cm/s).

5.4. PERFILAGEM ÓPTICA E ENSAIOS DE PERDA DE ÁGUA NA INVESTIGAÇÃO DE MACIÇOS FRATURADOS

5.4.1 – Perfilagem Óptica

A perfilagem óptica, também conhecida como televisamento ou Optical Televiewer – OTV possibilita a obtenção de imagens contínuas, orientadas e planas da superfície interna de um poço perfilado (Williams & Johnson 2004; Ribeiro 2012).

O equipamento de televisonamento consiste, simplificada, em uma sonda com corpo de aço, com uma câmera em sua parte interna, ligada a um cabo que, além de sustentar a sonda, envia os sinais adquiridos a uma central acoplada a um computador. Esta sonda é também equipada com um sistema de magnetômetros e acelerômetros tri-ortogonais, que possibilitam orientá-la espacialmente, além de um sistema de anotação de profundidade. O controle do sistema é efetuado por intermédio de um software de aquisição ligado diretamente à câmera. As imagens e dados obtidos são, posteriormente, exportados para outro software que permite o tratamento das informações obtidas (Oliveira *et al.*, 2013).

As imagens podem ser feitas tanto em furos sem água ou com água limpa. A lama de perfuração, precipitações químicas, crescimento de bactérias e outras condições que afetem a claridade da água dentro do furo de sondagem podem afetar a qualidade das

imagens. As imagens devem ser declinadas em relação ao norte geográfico, sendo que este ajuste pode ser realizado durante a aquisição da imagem ou posteriormente (Oliveira, 2015).

As imagens obtidas e enviadas pela câmera são inicialmente anelares, ou “enroladas”, exatamente como um testemunho virtual de sondagem (Baillot *et al.*, 2004). Em uma segunda fase essas imagens são processadas por um software, especialmente desenvolvido para a restituição da forma cilíndrica das paredes do furo (Figura 6), transformando estas imagens “enroladas” em imagens “desenroladas”, ou abertas, onde as estruturas inclinadas nesta imagem aparecem como perfis sinusoidais (Oliveira, 2015).

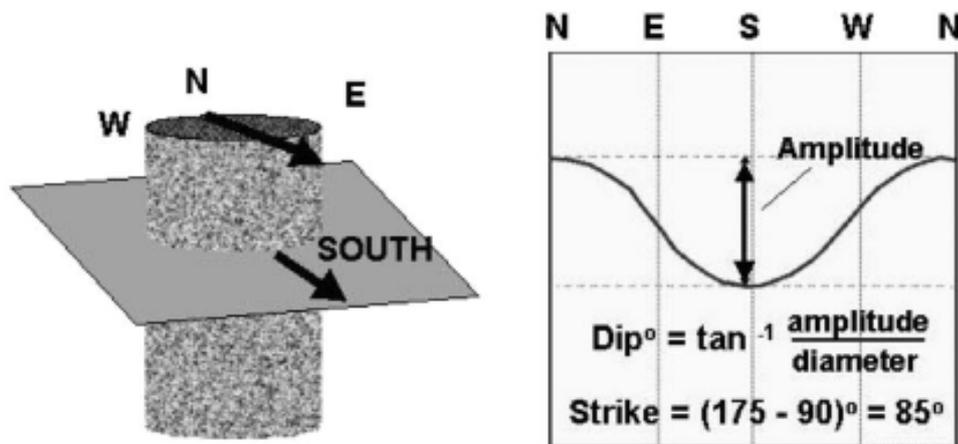


Figura 6 - Processo de abertura de imagens da perfilagem e cálculo da atitude de estruturas. Fonte: Williams & Johnson (2004).

A perfilagem óptica permite ampla caracterização das discontinuidades, permitindo obter grau de fraturamento, tipologia da discontinuidade, padrões de rugosidade, caracterização da abertura aparente de fraturas, preenchimento de discontinuidades, evidência de percolação de água e alteração das paredes das discontinuidades e do maciço adjacente, tendo como destaque o amplo fornecimento de dados estruturais das discontinuidades.

5.4.2 – Ensaio de perda de água sob pressão

O ensaio de perda de água sob pressão é bastante difundido na área geotécnica. Estes ensaios são realizados nas sondagens de reconhecimento geológico por meio do isolamento de trechos do maciço rochoso por meio do uso de obturadores de borracha, que podem ser mecânicos ou pneumáticos. São adotados obturadores superior e inferior (no caso de sondagens já concluídas ou obturador superior com isolamento inferior de fundo de furo (no caso de sondagens em andamento, desde que não tenham fraturas no fundo da manobra). Após a obturação dos intervalos de perfuração, é feita a injeção de água, sendo registrados vazão de água consumida pela fratura e pressão de injeção. Com base nos resultados pode-se obter informações sobre as características hidráulicas das famílias de fraturas (Figura 7).

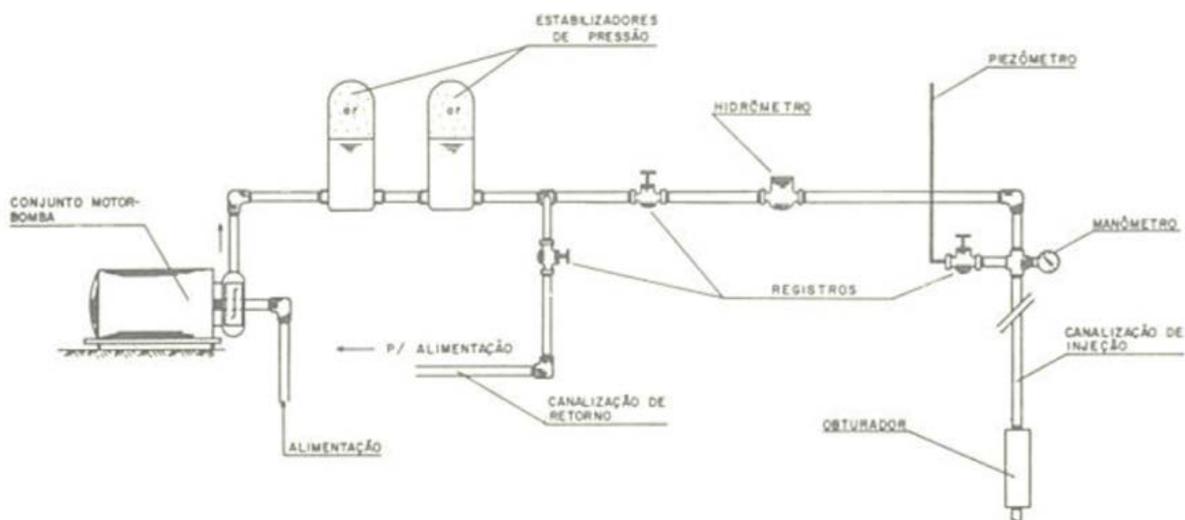


Figura 7 - Configuração dos equipamentos para o ensaio de perda de água sob pressão. Fonte: ABGE, 1975.

Este ensaio, mais conhecido internacionalmente por **Ensaio Lugeon**, deriva do ensaio proposto por Lugeon (1933) para verificar a estanqueidade de fundações de barragens. No Brasil o ensaio é mais utilizado para localizar as zonas de perda de água mais importantes e medir a permeabilidade pontual dos maciços rochosos (ABGE, 1975). Outra aplicação do ensaio, mais voltada para obras subterrâneas, é na quantificação do consumo de calda de cimento necessária para fechamentos de fraturas em escavações em maciços rochosos. O trabalho que descreve a prática brasileira e que inspirou a instrumento orientador supracitado é a dissertação de mestrado de Corrêa Filho (1985).

Para a realização do ensaio, ABGE (1975) e ABGE (2013a) preconizam a realização da injeção de água sob 5 estágios de pressão (registrados em kgf/cm²). Cada um desses estágios é mantido durante 10 minutos. A vazão de água consumida pelo maciço em cada estágio de pressão é registrada para identificação das zonas mais permeáveis do maciço. O primeiro e quinto estágio correspondem às pressões mínimas, o segundo e quarto estágio às pressões médias e terceiro estágio à pressão máxima.

Os ensaios realizados pela CMSP seguem as recomendações dos documentos orientadores da ABGE supracitados. Com relação aos intervalos de pressão tem-se: pressões máximas: 0,25 kgf/cm² por metro de profundidade do obturador, pressão média: a metade da pressão máxima e pressão mínima: 0,10 kgf/cm² (o que corresponde a um metro de coluna de água acima da superfície). Desta forma, o procedimento de ensaio realizado é descrito a seguir.

Inicialmente é executada a lavagem do furo até que a água de circulação esteja sem turbidez. É aplicado o primeiro estágio, sendo mantida a pressão mínima de ensaio durante o tempo necessário para estabelecimento de um regime de percolação permanente ou pelo tempo máximo de 10 minutos caso não seja observado o consumo de água.

A verificação da vedação dos obturadores é feita por meio do acompanhamento da evolução do NA durante o ensaio (fuga nos obturadores costumam provocar elevação no NA da sondagem), além da inspeção da integridade dos equipamentos antes de cada ensaio. Como medida adicional, a CMSP exige antes de cada ensaio a introdução e expansão dos obturadores, acompanhada de injeção de água, dentro de um revestimento de sondagem fora da perfuração; em caso de fuga de água, os obturadores devem ser trocados ou os equipamentos verificados.

A obturação de trechos extremamente alterados pode ser dificultada pela intensa irregularidade das paredes da perfuração. Deve-se evitar o uso de obturadores mecânicos quando observadas estas condições geológicas.

Na prática da execução do ensaio, após o estágio inicial de pressão passa-se aos demais estágios tomando-se as mesmas medidas adotadas para o 1º estágio.

Após a execução em campo, deve-se realizar a determinação dos resultados do ensaio conforme rotina descrita por ABGE (1975):

Após a realização do ensaio deve se proceder o cálculo da carga efetiva (C_e), este é dado por:

$$C_e = H/10 + P_m - P_c \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (3)$$

onde:

H = carga da coluna de água (m)

Pm = pressão manométrica (kg/cm²)

Pc = perda de carga na canalização (kg/cm²)

A carga da coluna de água (H) deve ser obtida de acordo com a condição hidrogeológica da sondagem:

$$H = h + N \quad (\text{quando o trecho ensaiado está abaixo do NA}) \quad (4)$$

$$H = h + P_{ob} + L/2 \quad (\text{quando o trecho ensaiado está acima do NA}) \quad (5)$$

$$H = h - N' \quad (\text{quando houver artesianismo}) \quad (6)$$

onde:

N = profundidade do NA (m)

N' = altura no NA em artesianismo (m)

Pob = profundidade do obturador (m)

L = comprimento do trecho ensaiado (m)

h = altura do manômetro (m)

Em seguida procede-se ao cálculo da vazão específica (QE) e da perda de água específica (PE), por meio das fórmulas:

$$QE = Q/L \quad (\text{litros/minuto/m}) \quad e \quad (7)$$

$$PE = QE/C_e \quad (\text{litros/minuto/m/kgf/cm}^2) \quad (8)$$

onde:

Q = vazão de água consumida (m³/s)

A obtenção da perda específica (PE) permite a identificação das zonas mais permeáveis do maciço no traçado em estudo e atende à avaliação hidrogeológica do maciço para fins de projetos em obras subterrâneas.

Adicionalmente procurou-se aplicar o cálculo do coeficiente de permeabilidade (K) para os trechos ensaiados, adotando a metodologia recomendada por ABGE (1975) a partir da fórmula utilizada em Franciss (1970):

$$K = PE \times F \text{ (cm/s)} \quad (9)$$

onde:

K = coeficiente de permeabilidade (cm/s)

F = fator de correção (adimensional)

O fator de correção (F) é obtido a partir do coeficiente de forma (Cf), também adimensional, conforme:

$$F = 1,66 / 2\pi \times 10^{-4} \times Cf \quad (10)$$

$$Cf = \text{Ln} (0,66 \times L / d / 2) \quad (11)$$

onde:

L = comprimento do trecho ensaiado (m)

d = diâmetro da sondagem (m)

6. MÉTODOS

6.1. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DE DETALHE

6.1.1. Levantamento Geofísico de Superfície

A caracterização geológica de detalhe teve início com a realização de levantamentos geofísicos. A metodologia aplicada foi a sísmica de reflexão.

As linhas geofísicas foram traçadas com o propósito de definir as características do subsolo ao longo do eixo do traçado previsto nas campanhas de investigação.

Os propósitos deste levantamento foram:

- Individualizar a espessura das camadas de cobertura (aterro superficial, solos de alteração de rocha e outros materiais de natureza variada) e definir profundidade e conformação do topo rochoso;
- Obter informações sobre as características de fraturamento e de alteração do maciço;
- Diferenciar os materiais do subsolo em parâmetros de velocidade sísmica;
- Permitir correlação com as informações proporcionadas pelas sondagens.

A sísmica de reflexão de alta resolução é a única técnica que pode ser aplicada, com uma elevada taxa de sucesso, em áreas urbanizadas.

Para registrar os impulsos sísmicos foi usado um sismógrafo ABM BR-24, com 24 canais em aquisição simultânea, acoplado a um “*roll switch*”, equipamento que permite o traslado dos 24 sensores de medida ao longo do alinhamento constituído por 48 geofones.

O registro das vibrações foi feito pelos geofones supracitados, de tipo eletromagnético, com bobina móvel de alta frequência (100 Hz). A distância entre os geofones adotadas neste levantamento de 2,5 metros.

A energização foi feita a passos de 1,25 metros, sendo um passo coincidente com a posição dos geofones e o outro passo à meia distância entre os geofones. Como o sistema se movimenta ao longo dos levantamentos, o último geofone do primeiro perfil corresponde ao primeiro do perfil sucessivo. Com esta configuração (ritmo de energização + espaçamento entre geofones), a profundidade de obtenção de dados foi de 40 metros (esta definida em função da profundidade da interação da obra civil).

Em laboratório foi providenciado o tratamento dos dados obtidos em campo com uso do software WINSEIS (Miller & Steeples, 1991) do Kansas *Geological Survey*, até a geração dos sismogramas definitivos.

6.1.2. Execução de sondagens de reconhecimento e piezômetros para caracterização geológica e hidrogeológica.

Para a caracterização geológica da área foram avaliados os perfis de sondagens do acervo técnico da CMSP. São sondagens mistas, com a realização de ensaio SPT na porção de solo e coleta de todos os testemunhos de rocha em perfuração rotativa. As sondagens foram realizadas e descritas conforme a especificação técnica de sondagens do Metrô-SP (CMSP, 2013a).

O sistema de classificação de perfis de alteração de rocha adotado no Metrô-SP foi adaptado do modelo de Deere & Patton (1971), que define o perfil de alteração como a sequência de camadas de diferentes propriedades físicas, formada *in situ* por alterações físicas e químicas (Figura 8). A porção do solo residual foi descrita conforme metodologia adaptada de Rocha (2004) e que é adotada pelo Metrô-SP em seus projetos, apresentada na Tabela 1.

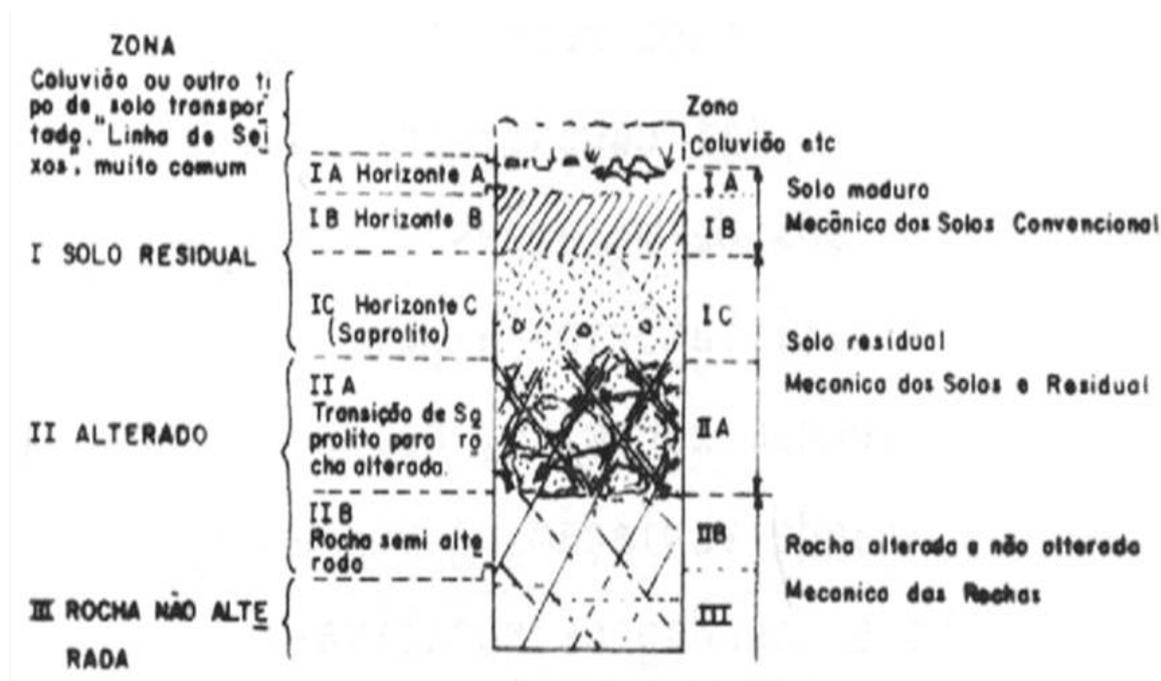


Figura 8 – Perfil de alteração típico. Fonte: Deere & Patton (1971), apud Rocha (2004).

Horizonte	Descrição	Estrutura	Comportamento	Avaliação
Solos Eluviais	Produtos finais da decomposição das rochas. São solos argilosos avermelhados com intensa incidência de processos pedogenéticos.	Estrutura homogênea e isotrópica	Comportamento típico da mecânica dos solos	Amostrável e avaliável pelo SPT.
Solo Residual Maduro	Produto da decomposição das rochas em elevado grau de intemperização (alteração). De maneira geral são siltes argilosos; os feldspatos já se transformaram totalmente em caulim (fração argila). Vários elementos solúveis já foram lixiviados. Já possui algum grau de laterização.	Estrutura homogênea e anisotrópica	Comportamento típico da mecânica dos solos	Amostrável e avaliável pelo SPT.
Solo Residual Jovem	Produto da decomposição das rochas em médio grau de intemperização (alteração). De maneira geral são siltes arenosos micáceos. Os minerais remanescentes conservam a estrutura original, porém com resistência mecânica muito reduzida.	Apresenta estruturas reliquias da rocha matriz, é anisotrópico e relativamente heterogêneo	Podem ocorrer raros matacões. É considerado solo para a geotecnia.	Amostrável e avaliável pelo SPT com trado e lavagem por tempo.
Saprólito	Transição entre solo e rocha. É composto basicamente por blocos ou porções de maciço rochoso em vários estágios de alteração, com dimensões variáveis e recoberto por solo residual.	Apresenta as estruturas originais da rocha, entretanto a resistência da matriz está muito reduzida devido ao intenso intemperismo químico.	A ocorrência de matacão é significativa. Possui propriedades geotécnicas tanto da mecânica das rochas, como da mecânica dos solos.	Não é possível avaliar com SPT. Penetrável apenas com ferramenta de lavagem da percussão e equipamento de sondagem rotativa.
Rocha	Rocha dura. Predomínio de rocha com eventuais preenchimentos de solo nas discontinuidades.	Rocha nos diversos graus de alteração, coerência fraturamento e dureza.	Domínio da mecânica das rochas	Amostrável com sondagem rotativa.

Tabela 1 – Classificação de perfil de alteração utilizado no Metrô-SP. Fonte: Modificado de Rocha (2004).

A porção rochosa foi analisada com relação à alteração, coerência e grau de fraturamento; as discontinuidades foram classificadas com relação as condições das superfícies, ocorrência de preenchimento e mergulho.

6.1.2.1. Grau de Alteração

O grau de alteração é um indicador do estágio de alteração mineralógica da rocha, decorrente da ação dos processos de intemperismo. O estágio de alteração é de suma importância para a Geologia de Engenharia pois, com raras exceções, quanto maior a alteração mineralógica, maior será a redução da resistência mecânica da rocha (ABGE, 2013b). O grau de alteração foi aplicado conforme CMSP (2013a), este adaptado de Tognon *et al.* (1981), conforme a Tabela 2.

SIMBOLOGIA	DESCRIÇÃO
A1 - ROCHA	- Não se percebe macroscopicamente qualquer indício de alteração física ou química dos minerais - Os minerais apresentam brilho
A2 - POUCO ALTERADA	- Nota-se incipiente descoloração de alguns minerais - Início de alteração nos minerais
A3 - MEDIANAMENTE ALTERADA	- Minerais medianamente alterados - Os minerais não apresentam brilho - Alteração da cor inicial da rocha - Propriedades físico-mecânicas inferiores às da rocha sã e pouca alterada
A4 - MUITO A EXTREMAMENTE ALTERADA	- Minerais muito alterados. - Os minerais apresentam-se pulverulentos, sob forma de solo de alteração

Tabela 2 –Classificação do grau de alteração para amostras de sondagens rotativas.
Fonte: CMSP (2013a).

6.1.2.2. Grau de Coerência

O grau de coerência avalia a resistência da rocha a esforços provocados por pressão dos dedos (friabilidade), resistência ao risco (dureza) e resistência ao impacto de martelo de geólogo (tenacidade). De maneira geral, o grau de coerência e o grau de alteração se complementam, ambos são correlacionáveis à resistência mecânica da rocha (ABGE, 2013b). O grau de alteração foi aplicado conforme CMSP (2013a), este adaptado de Guidicini *et al.* (1972), conforme a Tabela 3.

SIMBOLOGIA	DESCRIÇÃO
C1 – MUITO COERENTE	<ul style="list-style-type: none"> - Quebra com muita dificuldade ao golpe do martelo - O fragmento possui bordas cortantes que resistem ao corte p/ lâmina de aço - Superfície dificilmente riscável por lâmina de aço
C2 – COERENTE	<ul style="list-style-type: none"> - Quebra com relativa dificuldade ao golpe do martelo - O fragmento possui bordas cortantes que podem ser abatidas p/ lâmina de aço - A superfície é riscável por lâmina de aço
C3 – MEDIANAMENTE COERENTE	<ul style="list-style-type: none"> - Quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo - As bordas do fragmento quebram com dificuldade com a pressão dos dedos
C4 – POUCO COERENTE	<ul style="list-style-type: none"> - Esfarela ao golpe do martelo - As bordas quebram-se com facilidade pela pressão dos dedos - A lâmina de aço provoca sulco acentuado na superfície
C5 - FRIÁVEL	<ul style="list-style-type: none"> - Esfarela a qualquer golpe do martelo - Desagrega sob pressão dos dedos

Tabela 3 –Classificação do grau de alteração para amostras de sondagens rotativas.

Fonte: CMSP (2013a).

6.1.2.3. Grau de Fraturamento

O grau de fraturamento (em trechos de fraturamento homogêneo) indica o número de fraturas por metro que intercepta uma sondagem. É arredondado e apresentado como número inteiro. É o inverso do espaçamento entre fraturas e ambos são considerados itens fundamentais para a avaliação geológico-geotécnica de maciços rochosos (ABGE, 2013b). O grau de fraturamento é aplicado conforme CMSP (2013a), adaptado de IPT (1997b), conforme a Tabela 4.

SIMBOLOGIA	DESCRIÇÃO
F1 - POUCO FRATURADA	- Menos de 1 fratura por metro
F2 - FRATURADA	- 1 a 5 fraturas por metro
F3 - MUITO FRATURADA	- 6 a 10 fraturas por metro
F4 - EXTREMAMENTE FRATURADA	- 11 a 20 fraturas por metro
F5 - FRAGMENTADA	- Mais de 20 fraturas por metro

Tabela 4 –Classificação do grau de fraturamento para amostras de sondagens rotativas. Fonte: CMSP (2013a).

Para a caracterização hidrogeológica da área de estudo foram instalados piezômetros do tipo Casagrande, que são constituídos por tubos de PVC rígido com 2” de diâmetro, inseridos em um furo de 4”.

Nos trechos posicionados nos estratos de interesse, foram utilizados tubos filtros e o espaço entre o revestimento e a parede da formação geológica foi preenchido por material de pré-filtro, conforme a especificação de serviços do Metrô de São Paulo (CMSP, 1981 - Figura 9). Abaixo dos trechos de filtro, foram colocados tubos lisos com 0,50 m de comprimento, para a decantação das partículas finas que eventualmente penetrarem pelas aberturas. Imediatamente acima do material filtrante foi colocada camada com aproximadamente 50 cm de areia fina, e acima desse material foi lançada uma mistura de bentonita com cimento, formando camada de até 2 m de espessura. Acima da mistura de bentonita e cimento, o trecho entre o revestimento do poço e a parede da formação geológica foi preenchido com argila compactada.

Após a instalação dos piezômetros, estes foram lavados e, após a sua estabilização, realizado o ensaio de infiltração, também conforme a especificação de serviços do Metrô de São Paulo (CMSP, 1981).

O ensaio de infiltração foi feito por meio da saturação do instrumento, até a água atingir a boca do tubo, iniciando-se imediatamente a contagem do tempo de 1 minuto para a 1ª leitura da sequência do ensaio. Com o medidor elétrico de nível d'água, foram executadas as seguintes leituras:

3 leituras com intervalo de 1 minuto cada;

4 leituras com intervalo de 3 minuto cada;

3 leituras com intervalo de 5 minuto cada;

3 leituras com intervalo de 10 minuto cada;

4 leituras com intervalo de 15 minuto cada;

Leituras de 30 em 30 minutos até a estabilização completa do aparelho.

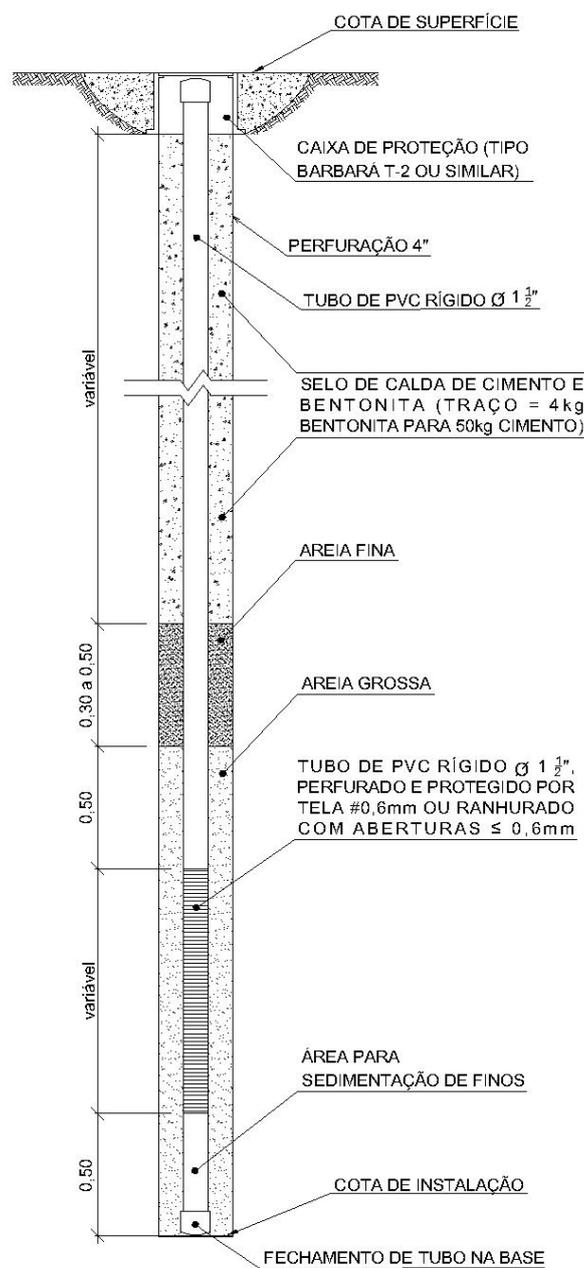


Figura 9 - Perfil construtivo de piezômetros conforme a especificação de serviços do Metrô-SP. Fonte: CMSP (1981).

Os dados dos ensaios de infiltração foram tratados no software Aquifer Test 2016, para a obtenção da condutividade hidráulica pelos métodos de Hvorslev (1951) e Bower & Rice (1976).

6.2. PERFILAGEM ÓPTICA

A perfilagem óptica seguiu as diretrizes apontadas na especificação técnica do Metrô-SP, publicada como CMSP (2013b), adaptada do trabalho de Oliveira *et al.* (2013).

Para o processo de aquisição das imagens em campo procurou-se garantir que a perfuração estivesse limpa, garantindo que informações não sejam ocultadas pela presença de água turva em seu interior. Para a perfilagem de furos inclinados, a aquisição das imagens foi realizada imediatamente após a conclusão da sondagem, uma vez que a experiência mostra que os furos inclinados possuem maior possibilidade de aporte de material, o que torna a água turva, além da instabilidade de fragmentos de rochas.

Neste estudo foi utilizado o equipamento Hi-OPTV da empresa *Robertson Geologging Ltd*, operado por colaboradores da empresa Alphageos Tecnologia Aplicada.

A declinação magnética foi incluída apenas na fase de tratamento de dados, com a utilização da declinação apontada pelo Observatório Nacional (disponível na internet), para a data da aquisição das imagens.

Para o tratamento e visualização tridimensional das imagens foi utilizado o programa MakiCad, tal como apontado em Baillot *et al.* (2004). As discontinuidades foram tratadas com o programa RGLdip (versão 6.2). Foram descritas tanto a matriz rochosa como as discontinuidades que a delimita. Sendo assim, descrições e interpretações foram divididas em duas partes distintas. Da matriz rochosa foram descritos os aspectos do corpo rochoso, incluindo estruturas ditas penetrativas, que não interrompam necessariamente a continuidade física do meio rochoso (foliação, xistosidade, bandamento, acamamento, dobramentos, veios, etc).

A foliação foi registrada, quando observada, ao longo de toda a imagem do furo de sondagem, verificando se houve mudanças relevantes na sua orientação.

Para as discontinuidades, foram descritos os seguintes parâmetros: orientação, tipo de estrutura, espaçamento, rugosidade, abertura aparente, existência de preenchimento, alteração das paredes, percolação de água e grau de fraturamento.

6.2.1. Rugosidade

A rugosidade em uma discontinuidade foi observada com o uso da projeção de uma linha reta como referência, por meio da seleção de três pontos que definem o plano da discontinuidade no espaço (Figura 10). Ao serem marcados os traços de discontinuidades no testemunho virtual, quanto mais esta linha fica inserida no traço da discontinuidade na

imagem, menos rugosa esta seria e vice-versa. Esta rotina está apontada em CMSP (2013b) e Oliveira *et al.* (2013).

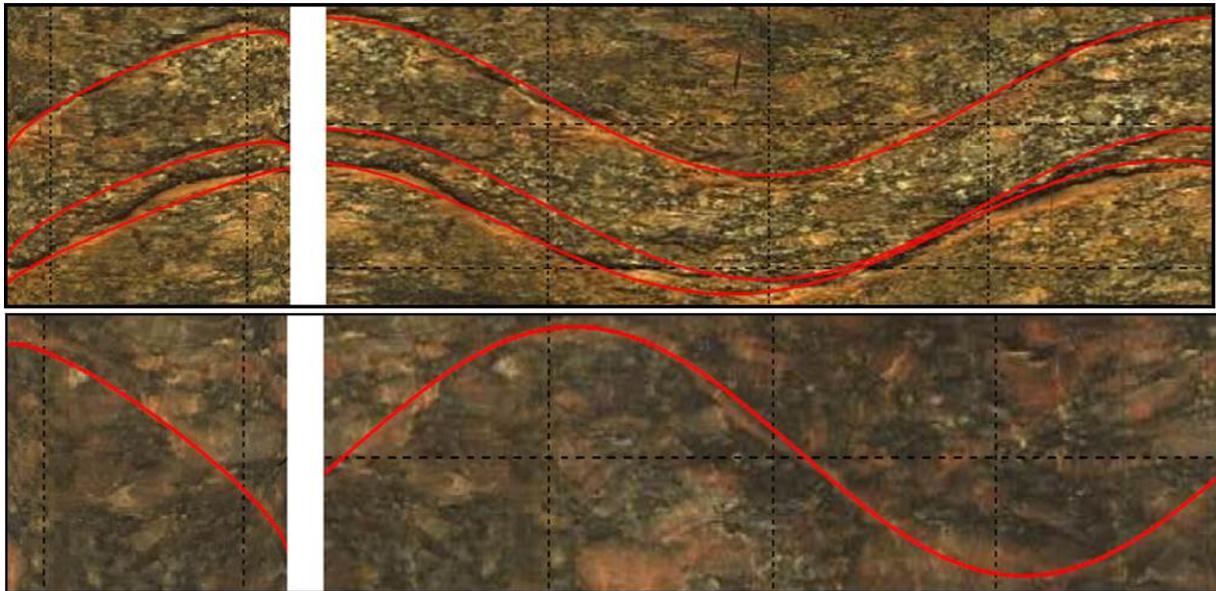


Figura 10 – Exemplos de delimitação de rugosidade em imagens de perfilagem óptica. A: descontinuidade rugosa e B: descontinuidade lisa. Fonte: CMSP (2013b) e Oliveira *et al.* (2013).

6.2.2. Abertura Aparente

Para a abertura aparente, seguiu-se a orientação de CMSP (2013b), considerando a distância ortogonal entre as duas paredes que contemplam o topo e a base de cada descontinuidade. Para indicação da abertura aparente foi utilizada a tabela de abertura fornecida nos métodos de descrição e caracterização de descontinuidades de ISRM (1978), conforme:

- Descontinuidades fechadas: abertura aparente menor do que 0,5 mm.
- Descontinuidades semi-abertas: aberturas aparentes entre 0,5 mm e 10,0 mm.
- Descontinuidades abertas: aberturas aparentes superiores a 10,0 mm.

6.2.3. Preenchimento, Percolação de Água e Alteração das Paredes Adjacentes

As condições de alteração das paredes adjacentes às discontinuidades foram avaliadas considerando o brilho dos minerais ao longo das feições. A ocorrência de percolação de água apenas é possível ser observada em trechos acima do nível d'água. Também foi observada a ocorrência de oxidação nas discontinuidades, por meio da observação de coloração característica.

6.3. TRATAMENTO DOS DADOS ESTRUTURAIS

Os dados estruturais obtidos pela perfilagem óptica (atitude das fraturas) foram transferidos para planilhas excel em notação clara. Posteriormente estes dados foram transferidos para arquivos de bloco de nota, na extensão .txt, para a elaboração dos primeiros estereogramas. Os estereogramas foram elaborados com o software Open Stereo, com projeção de igual área em hemisfério inferior.

Os principais grupos foram caracterizados por meio da observação de suas ocorrências nos diversos estereogramas elaborados.

Para análise da quantidade e espaçamento de fraturas foi aplicada a correção de Terzaghi (1965), para as fraturas com α maior que 20° . O ângulo α é obtido pela subtração do ângulo de mergulho da fratura pelo ângulo de mergulho do furo. Esta correção se faz necessária em razão do enviesamento dos dados provocado pela maior quantidade de sondagens verticais, que sub-amostram estruturas de alto ângulo.

O método de Terzaghi se baseia na aplicação de um fator de correção a cada feição observada, mas ressalta que não é possível realizar correções para valores de α inferiores a 20° . Após a correção dos espaçamentos pelo método de Terzaghi, foram elaborados novos estereogramas com densidade de polos corrigidas. A correção também permitiu o cálculo das quantidades reais de fraturas para um dado comprimento de sondagem e do espaçamento corrigido.

O espaçamento médio dentro dos intervalos das sondagens foi obtido a partir da divisão do número de fraturas corrigidas pelo intervalo de ocorrência delas. Nos casos de estruturas que não foram corrigidas em função de valores de α abaixo de 20° , considerou-se a quantidade de estruturas efetivamente observadas nas imagens da perfilagem óptica. Não foram calculados os espaçamentos nos casos em que foram observadas muitas fraturas com α abaixo de 20° .

O padrão de distribuição das fraturas nos seus intervalos de ocorrência foi classificado conforme o modelo utilizado por Pino (2012), que separa as discontinuidades em aleatória, regular, regular variada e regular concentrada (Figura 11).

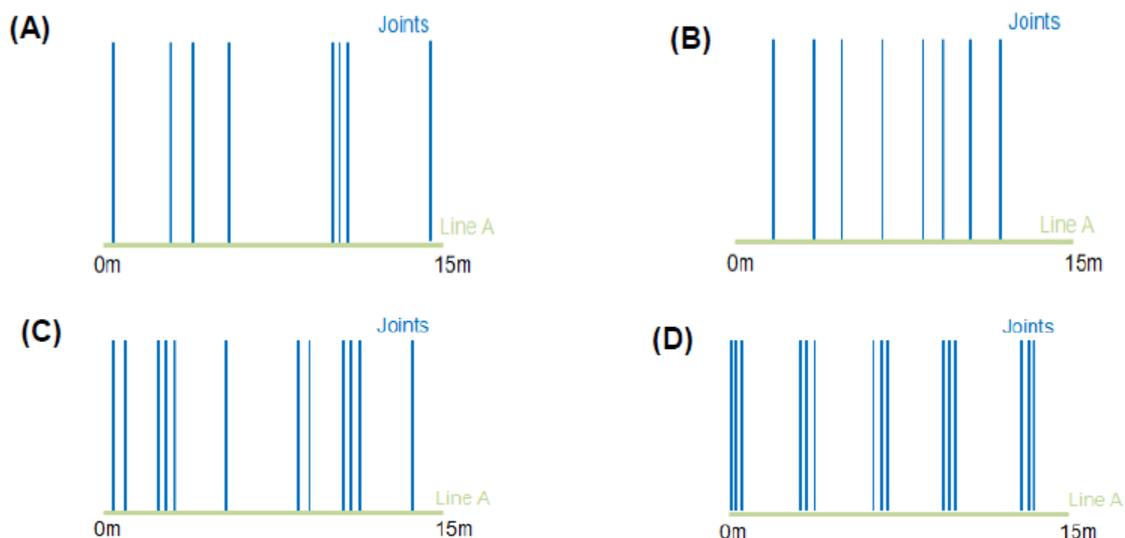


Figura 11 – Padrões de distribuição de fraturas. A: Aleatória, B: Regular, C: Regular Variada e D: Regular Concentrada. Fonte: Pino (2012).

6.4. ENSAIOS DE PERDA DE ÁGUA SOB PRESSÃO

Os ensaios de perda de água sob pressão foram realizados conforme orientações da ABGE, publicadas sob boletim específico (ABGE, 1975).

A definição dos intervalos para execução destes ensaios foi feita a partir da observação das imagens provenientes da perfilagem óptica e consulta aos testemunhos de sondagens. Os ensaios foram realizados em intervalos onde houve a observação de, ao menos, uma das seguintes feições: abertura aparente, presença de alteração nas paredes adjacentes e presença de oxidação.

Para este estudo foram realizados 93 ensaios distribuídos em 19 sondagens conforme os critérios acima descritos. Em 9 ensaios constatou-se impossibilidade de obturação e estes foram cancelados ou descartados. Para as avaliações deste estudo foram utilizados 84 ensaios.

Os ensaios foram realizados com obturadores de borracha mecânicos, duplos; foram utilizadas tubulações de 1" de ferro fundido.

Uma vez que as pressões média e máxima podem provocar alteração das condições naturais das discontinuidades por meio da remoção de preenchimentos, deformação das

fraturas (seja por abertura ou fechamento), passagem do regime de fluxo laminar para o regime de fluxo turbulento e até fraturamento hidráulico, optou-se neste estudo por utilizar apenas os dados do primeiro estágio de pressão inicial (baixa pressão). Desta forma este estudo é realizado apenas com os dados de consumo sem possibilidade de alteração das condições de geometria naturais das fraturas (isso inclui a preservação de eventuais obstruções total ou parcial, provocada por preenchimentos). A pressão mínima foi mantida pela manutenção da coluna de água na tubulação do obturador (similar a um ensaio de infiltração).

Após mantida a coluna de água para a pressão baixa, esta foi mantida por até 10 minutos, sendo observada descida de água no funil. Nos casos em que há o consumo de água no estágio de baixa pressão, o nível de água no funil desce, dessa forma pode-se quantificar o volume de água consumida neste estágio de pressão do ensaio.

6.5. ENSAIO DE BOMBEAMENTO DO MEIO FRATURADO COM MONITORAMENTO DO SOLO RESIDUAL.

O ensaio de bombeamento contou com uma infraestrutura composta por 1 poço de bombeamento explorando apenas a porção em rocha e uma rede de 17 piezômetros com seção filtrante de 1 metro cada, distribuídos radialmente a distâncias de 5, 10 e 20 metros.

Para o poço de bombeamento em rocha foi feita uma perfuração rotativa de 32 metros de comprimento com lavagem por circulação reversa, sob a seguinte sequência construtiva:

- instalação da perfuratriz e execução de furo guia (PC-01) com diâmetro 2 ½”, até 32 metros de profundidade;
- perfuração do trecho em solo com revestimento de 14”;
- perfuração nos 3 metros iniciais de rocha com diâmetro de 11”;
- colocação de revestimento de 8” da superfície até os 3 primeiros metros em rocha;
- perfuração do trecho a partir de 3 metros em rocha com diâmetro de 7 ¼”;
- remoção do revestimento de 14” simultaneamente à obturação do espaço entre a parede da formação geológica e o revestimento com selo de bentonita;
- limpeza do material depositado na perfuração por meio de “*air lift*”.

A Figura 12 apresenta o esquema construtivo do poço GRU-001.

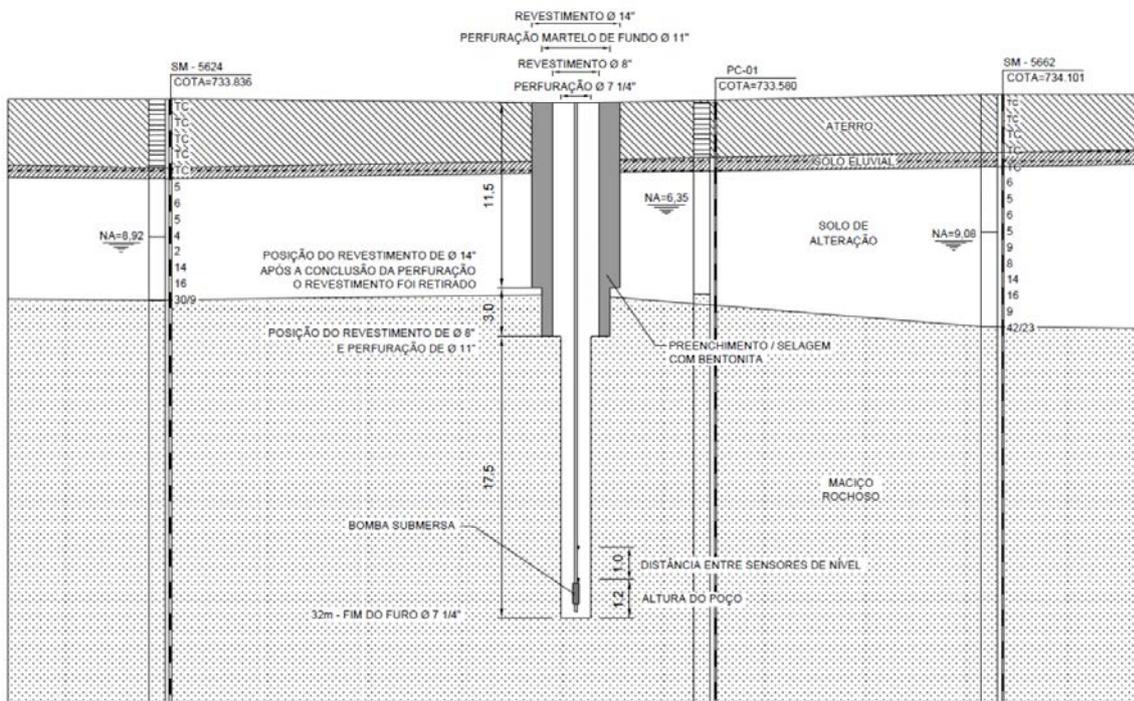


Figura 12 - Representação do poço GRU-001

O ensaio foi compreendido por um período de 72 horas de bombeamento, observando os rebaixamentos dos níveis d'água nos 17 piezômetros e 24 horas com a bomba do poço desligada, observando a recuperação dos seus níveis d'água. A frequência das leituras adotada foi a do Manual de Operação e Manutenção de Poços (DAEE, 2007). Os dados da evolução do nível d'água foram observados para identificar rebaixamentos associados ao bombeamento do poço GRU-001.

7. RESULTADOS

7.1. GEOLOGIA LOCAL

A seção geológica traçada a partir dos dados de sondagens e sismogramas obtidos em campo permitiram identificar 3 unidades geológicas majoritárias: embasamento rochoso com seus produtos de alteração em quatro estágios (saprólito, solos residuais jovem e maduro e solos eluviais), sedimentos da Formação Resende e coberturas quaternárias associadas à planície aluvial do Rio Tietê e às demais drenagens (Figura 13). A geofísica em conjunto com as sondagens revela que o topo do embasamento apresenta notável irregularidade, com aspecto antiforme ao longo do eixo NE-SW (Figuras 14 a 20). Foram identificadas estruturas de alto ângulo, que evidenciam mudanças bruscas de respostas de reflexão e são interpretadas como falhamentos. A forma de configuração destes falhamentos se diferenciam em espessura de rejeito e orientação, sendo possível indicar que os falhamentos com direção aproximada NW-SE apresentam-se mais pronunciados, com respostas sísmicas mais evidentes e rejeito aparente de 12 a 15 metros; os falhamentos com direção aproximada NE-SW, apesar de terem boa resposta sísmica, apresentam rejeito aparente de até 5 metros (Figuras 14 a 20). Ressalta-se que uma vez que o traçado está alinhado preferencialmente a NE, os falhamentos em direções aproximadas NW-SE foram mais observados do que os demais.

O trecho do traçado se inicia na região do VSE Basuca (cerca de 150 metros a sudeste da pista sentido interior da Marginal Tietê); nesta região temos o embasamento pré-cambriano e uma camada de cerca de 5 metros de solo residual, cobertos por sedimentos paleógenos da Bacia de São Paulo. Esta é uma região associada ao falhamento de Taxaquara, que posiciona em mesma cota materiais associados ao embasamento e à cobertura sedimentar.

Ao longo do cruzamento do traçado com o Rio Tietê e suas pistas marginais, há interação exclusiva com a cobertura sedimentar paleógena. Nesta região o embasamento pré-cambriano não foi interceptado pelas sondagens executadas e o seu topo rochoso encontra-se abaixo da cota 682 m; este cenário se estende até as proximidades da Estação Paulo Freire, situado na avenida homônima, uma via paralela da Marginal Tietê, em orientação NE-SW.

Neste ponto, o sistema de falhamentos recoloca o maciço pré-cambriano em interação com o traçado estudado, com o topo rochoso subindo gradativamente da cota 700 m para a cota 720 m, na região de encontro com o alinhamento NNW-SSE do Rio Cabuçu.

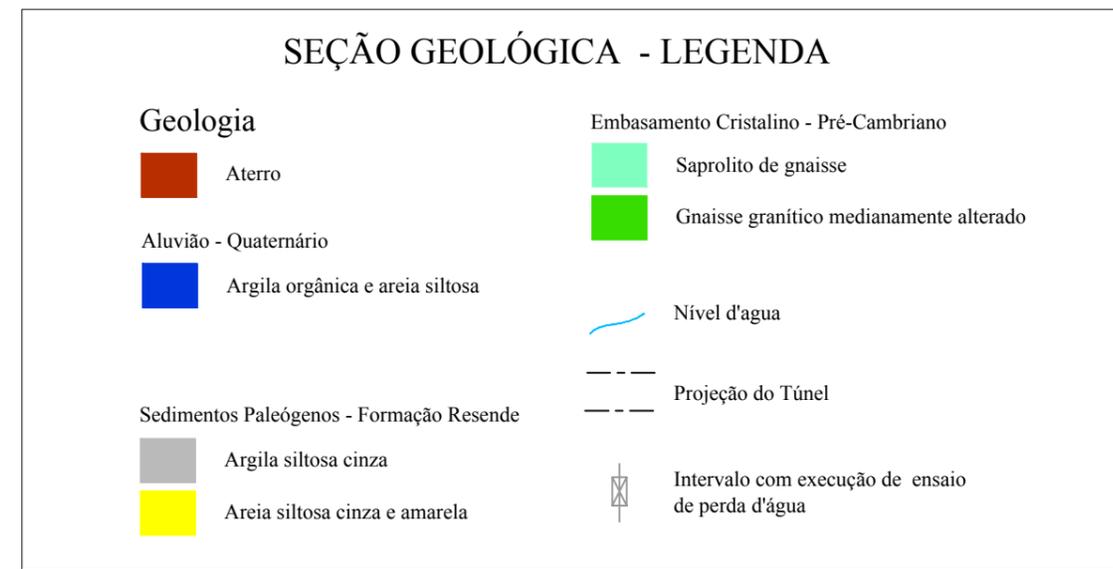
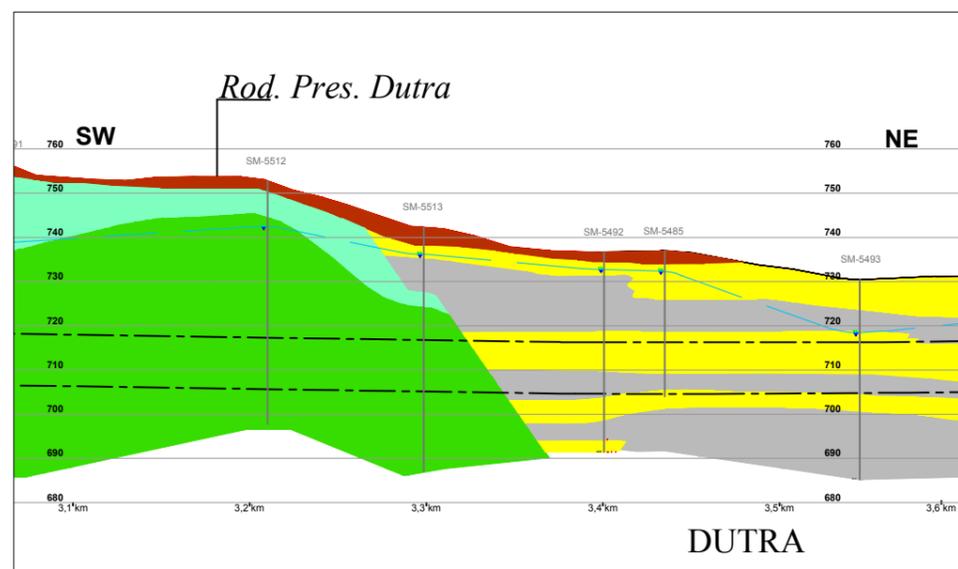
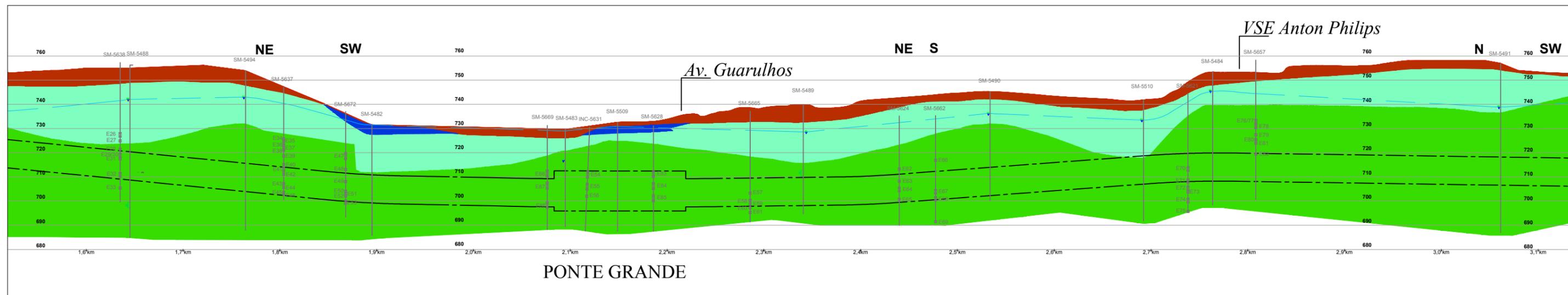
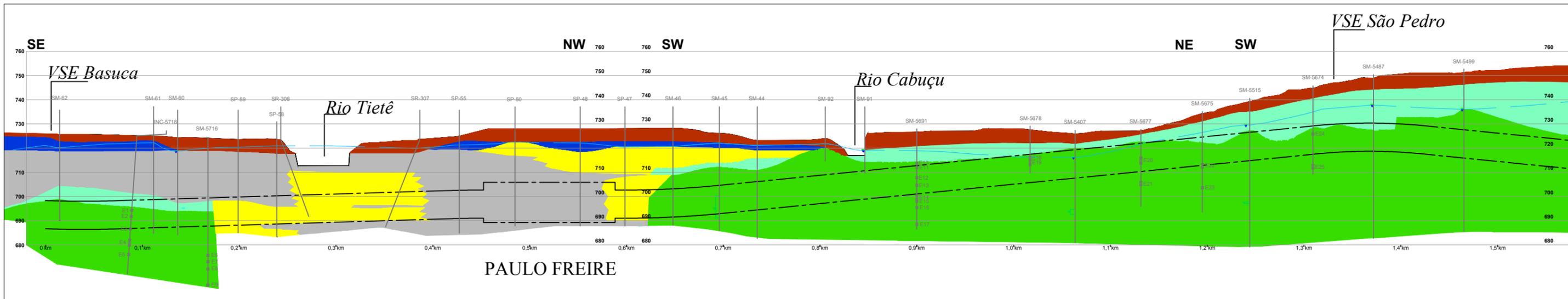


Figura 13 - Seção geológica da área de estudo com base em sondagens e levantamentos geofísicos

A partir do Rio Cabuçu (já dentro dos limites do município de Guarulhos), não há ocorrência de sedimentos paleógenos nas sondagens executadas e a estratigrafia passa a ser composta pelo embasamento, solos residuais, coberturas aluvionares localizadas e camadas de aterro. Neste local o topo rochoso é bastante irregular, variando entre as cotas 710 m a 742 m, com pontos de variações bruscas condicionadas por falhamentos geológicos (os levantamentos geofísicos contribuíram para estas observações).

Sob as condições estratigráficas supracitadas, o traçado percorre a região da Estação Ponte Grande (percorrendo a Avenida Guarulhos) e do VSE Anton Philips, até a Rodovia Presidente Dutra (em alinhamento NE-SW). Junto à margem do sentido São Paulo da rodovia há uma descida do topo do embasamento pré-cambriano, deixando a cota 740 m para profundidades abaixo da cota 690 m (região do Shopping Internacional de Guarulhos); neste ponto, as sondagens não mais interceptam materiais pré-cambrianos, tampouco seus produtos de alteração, e até o final do trecho há apenas materiais da cobertura paleógena da Bacia de São Paulo.



Figura 14 - Linhas de levantamentos geofísicos realizadas longitudinal e perpendicularmente à Av. Guarulhos.

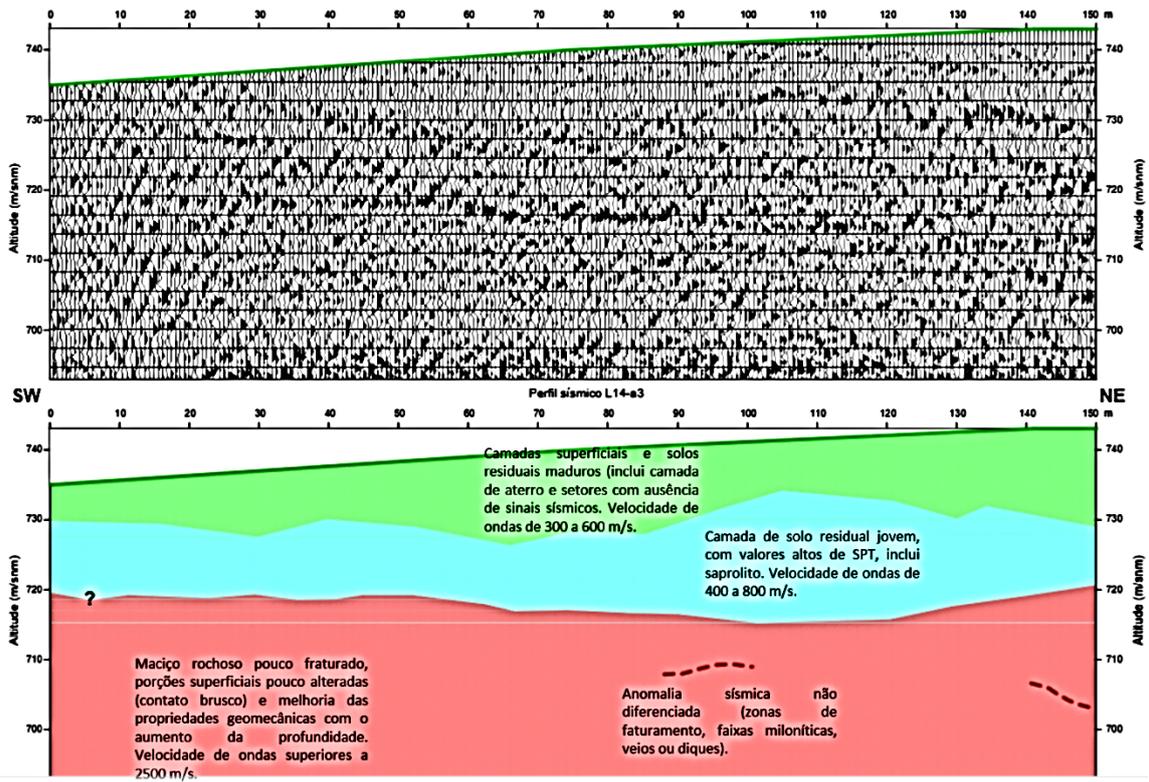


Figura 15 - Linha sísmica L14a3 – Avenida Guarulhos. Fonte: EEG (2013).

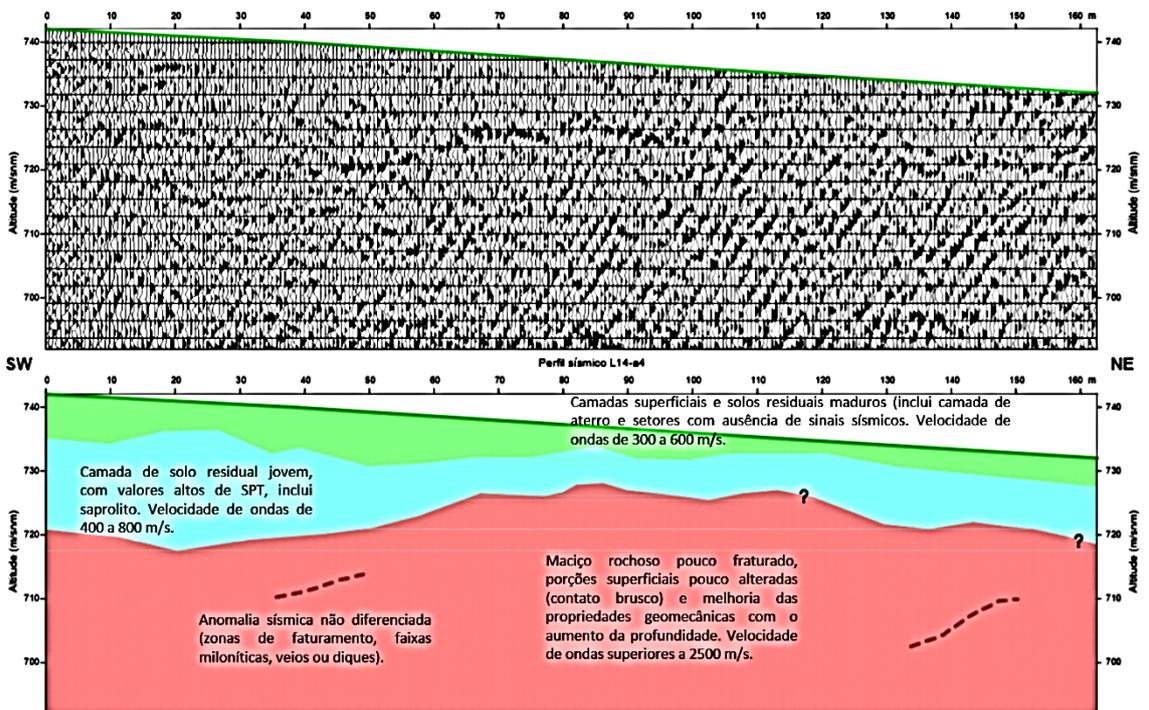


Figura 16 - Linha sísmica L14a4 – Avenida Guarulhos. Fonte: EEG (2013).

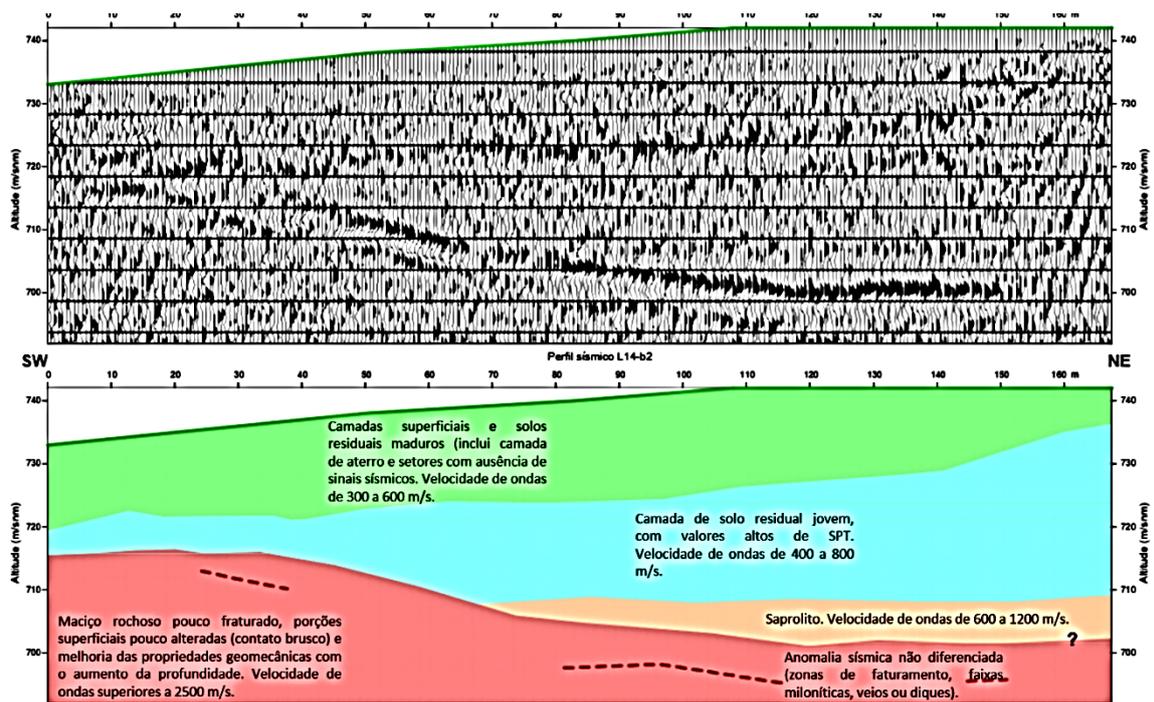


Figura 17 - Linha sísmica L14b2 – Avenida Guarulhos. Fonte: EEG (2013).

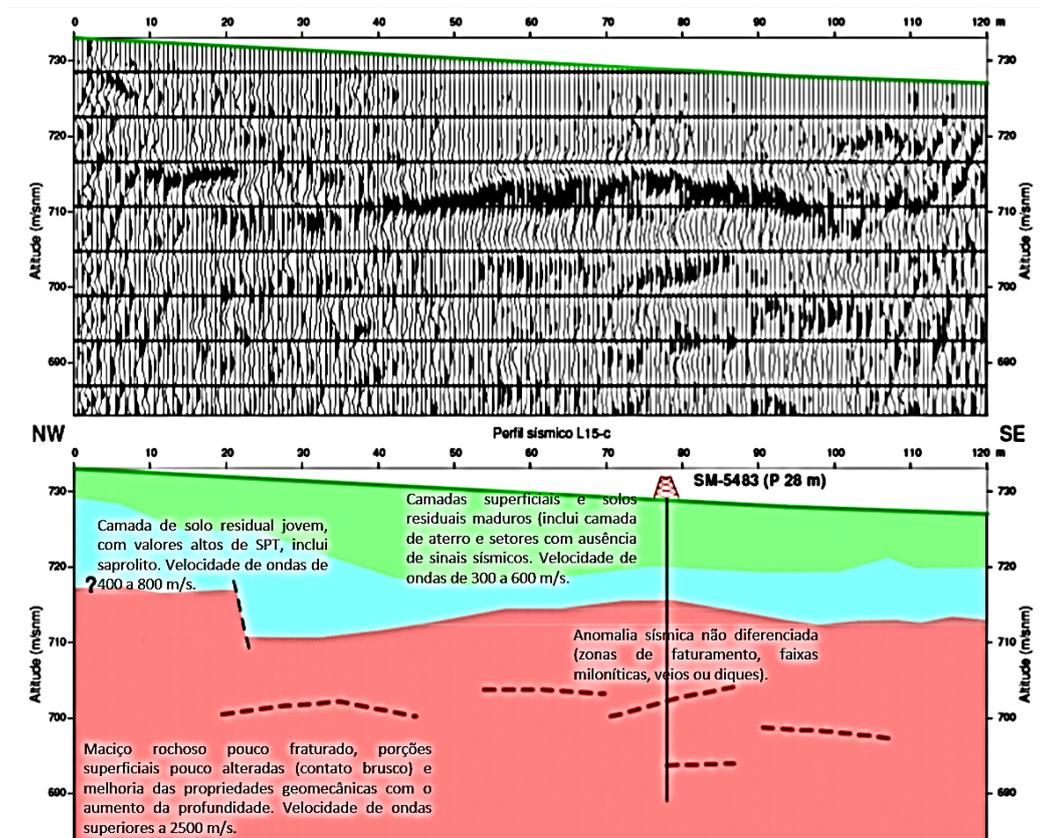


Figura 18 - Linha sísmica L15c – Rua Joaquim I. da Silva. Notar estrutura NE-SW interpretada como falha geológica. Fonte: EEG (2013).

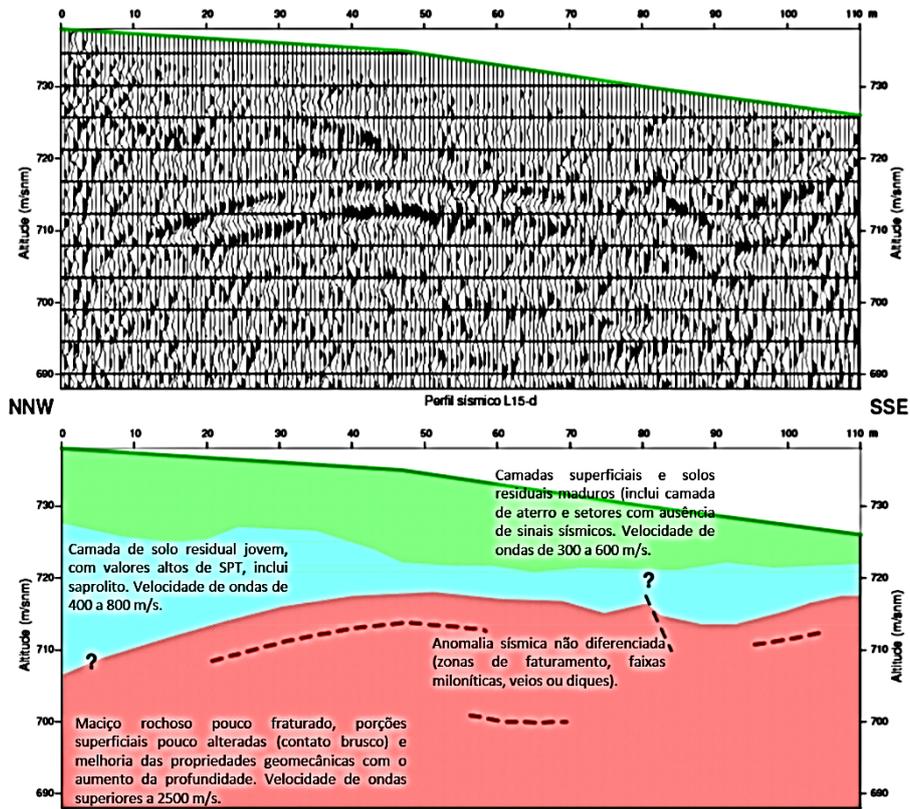


Figura 19 - Linha sísmica L15d. Fonte EEG (2013).

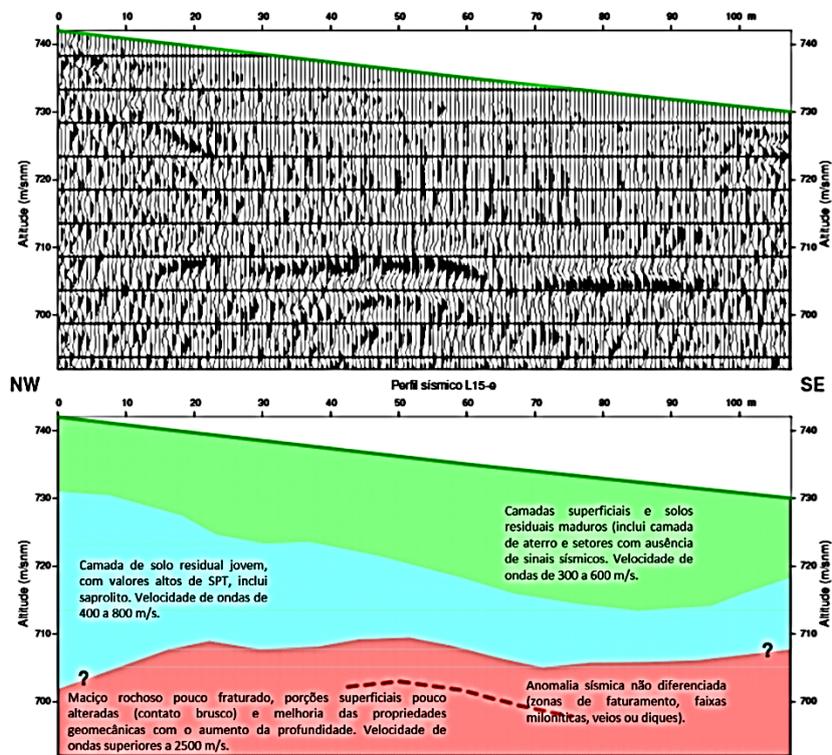


Figura 20 - Linha sísmica L15e – Rua Anna da Silva. Fonte: EEG (2013).

O embasamento pré-cambriano é representado por duas variedades litológicas. O litotipo mais abundante e predominante nas regiões internas do maciço é um granito-gnaiss porfirítico, com matriz inequigranular, de granulometria fina a média, composta predominantemente por feldspato, quartzo e biotita desenvolvendo uma foliação muito discreta. Nas regiões próximas a falhamentos nota-se a ocorrência de anfibólio biotita gnaiss com foliação bastante marcada. Há uma significativa ocorrência de veios, em sua maioria horizontais a sub-horizontais, predominantemente quartzo-feldspáticos e estruturas tabulares de mineralogia máfica.

A petrografia do litotipo predominante forneceu elementos que contribuem com a contextualização geológica da área de estudo. A principal informação a ser considerada é a de que, embora a avaliação macroscópica dos testemunhos, bem como seu comportamento geomecânico indique litotipo granítico, a petrografia revelou a presença de discreta foliação (conforme supracitado). Algumas amostras apresentam textura cataclástica, com minerais triturados e, por vezes, deformados. Isso corrobora para o contexto geológico da área de estudo, posicionada relativamente próxima à faixa associada ao falhamento do Taxaquara (Figura 21).

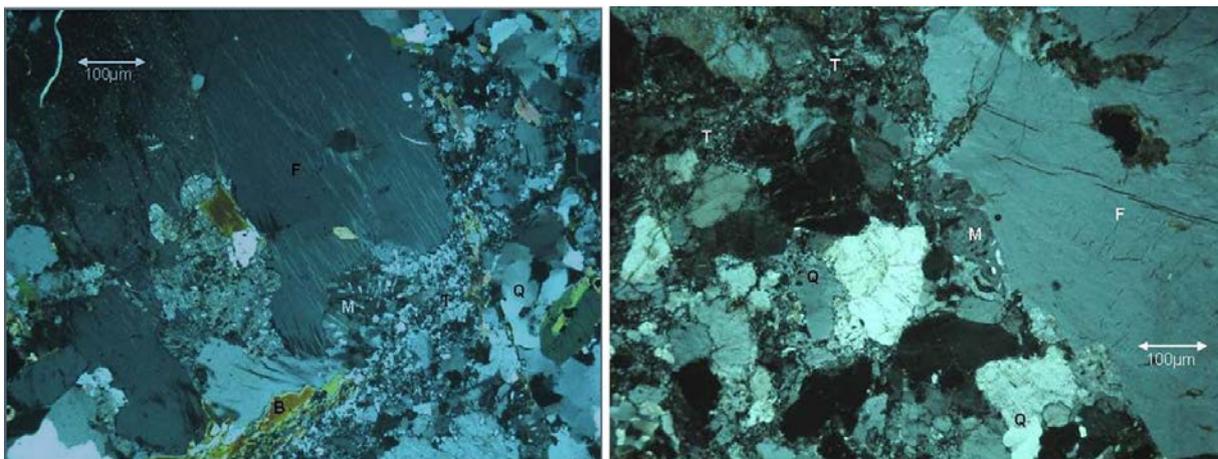


Figura 21 - Fotomicrografia de lâminas da sondagem 5631, litotipo granito-gnáissico, Estação Ponte Grande. Nicóis cruzados, ampliação de 10 x. Fonte: arquivo técnico da CMSP.

Com o intuito de avaliar possíveis variações petrográficas na rocha granítica em profundidade, na área da Estação Ponte Grande foram selecionadas amostras para petrografia em diferentes profundidades (amostra A – 5,40 a 8,00 m, amostras B e C – 15,00 a 18,00 m e amostra D – 27,00 a 31,00 m). Não foram observadas variações significativas nas amostras. A Tabela 5 apresenta um quadro resumo da petrografia na área da Estação Ponte Grande.

A mineralogia principal possui quartzo + feldspato (plagioclásio e microclínio), correspondendo a 70% da rocha e biotita com 15%. Na mineralogia secundária são encontrados anfibólio, clorita, sericita, muscovita, titanita, além de minerais opacos. A rocha é muito coerente e possui baixa microfissuração. As condições de alteração são baixas e representadas principalmente pela passagem do feldspato para sericita-muscovita.

Tabela 5 - Resultados da petrografia em amostras da sondagem 5631, litotipo granito-gnáissico, Estação Ponte Grande. Fonte: Arquivo Técnico da CMSP.

Sondagem	5631			
	5,4 m - 8,0 m	15,0 m - 18,0 m (lâmina 1)	15,0 m - 18,0 m (lâmina 2)	27,0 m - 30,0 m
Quartzo	35,0%	30,0%	35,0%	30,0%
Feldspatos	45,0%	40,0%	40,0%	40,0%
Anfibólio	-	5,0%	5,0%	5,0%
Biotita	15,0%	15,0%	15,0%	15,0%
Sericita-Muscovita	5,0%	8,0%	4,0%	5,0%
Clorita		2,0%	1,0%	5,0%
Opacos				
Titanita				
TOTAL	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Com os resultados da perfilagem óptica, descrição macroscópica dos testemunhos de sondagens e da petrografia é possível constatar que o maciço possui uma faciologia predominante representada por um granito-gnaiss. Nas áreas mais próximas de falhamentos e zonas de cisalhamento são observadas ocorrências de litotipo intensamente gnaissificado. As filmagens dos pontos também evidenciaram que as porções mais alteradas estão imediatamente acima da rocha sã.

As zonas de fraturas encontram-se espaçadas, sendo comum observar grandes intervalos de rocha sem fraturas. Observa-se também uma abundância de fraturamentos horizontais a sub-horizontais nas porções superiores do maciço, o que também foi observado nos levantamentos geofísicos.

A Figura 22 apresenta o mapa geológico a partir da base de EMPLASA (1986), com os pontos de sondagens utilizados para a elaboração da seção geológica da área de estudo e com os pontos de perfilagem óptica e seus respectivos estereogramas que subsidiaram a análise estrutural realizada. A perfilagem óptica permitiu a identificação de 8 grupos principais de estruturas no maciço. Estes grupos são os mais presentes nas sondagens realizadas nos dois litotipos observados. A projeção espacial de cada grupo é apresentada nas Figuras 23 a 25.

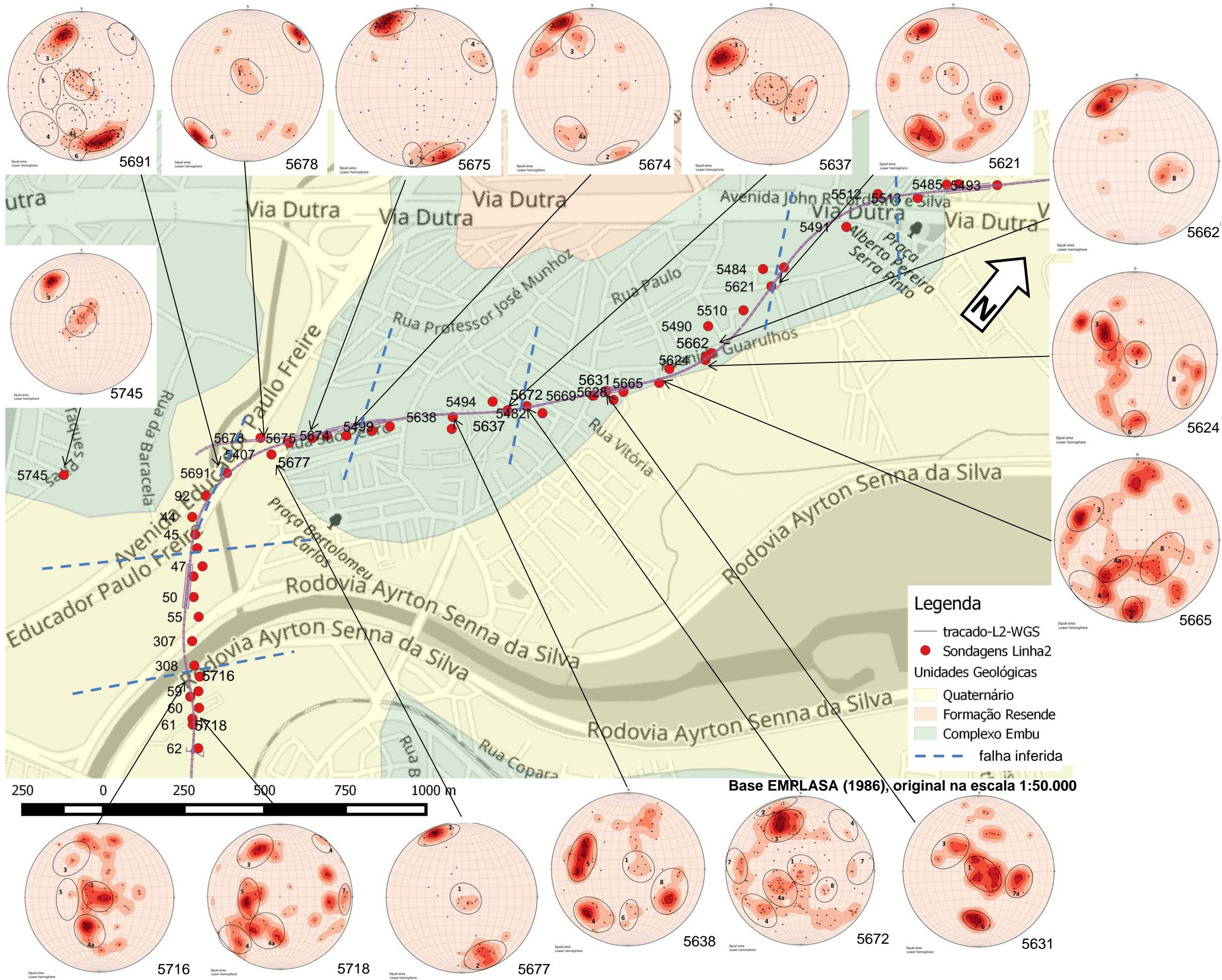


Figura 22 – Mapa geológico de pontos de sondagens e perfilagens ópticas.

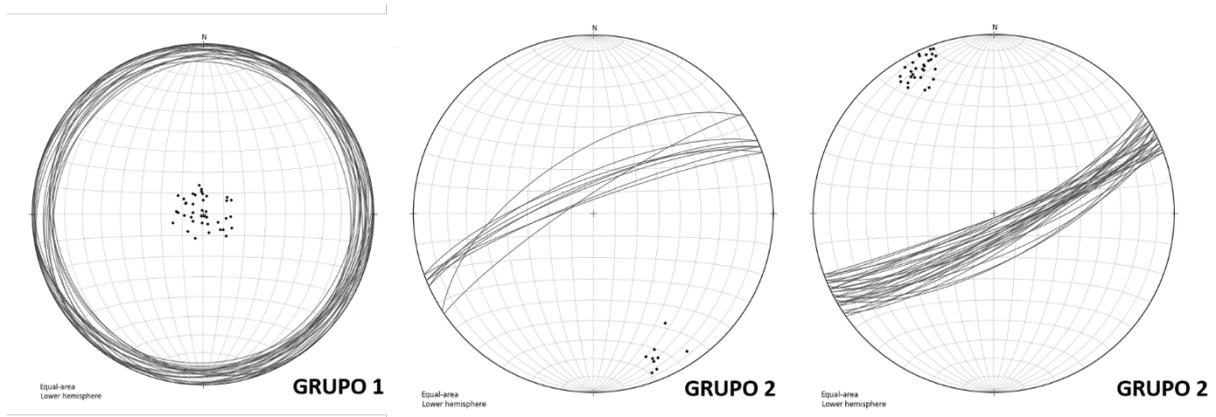


Figura 23 - Representação das estruturas dos grupos 1 e 2

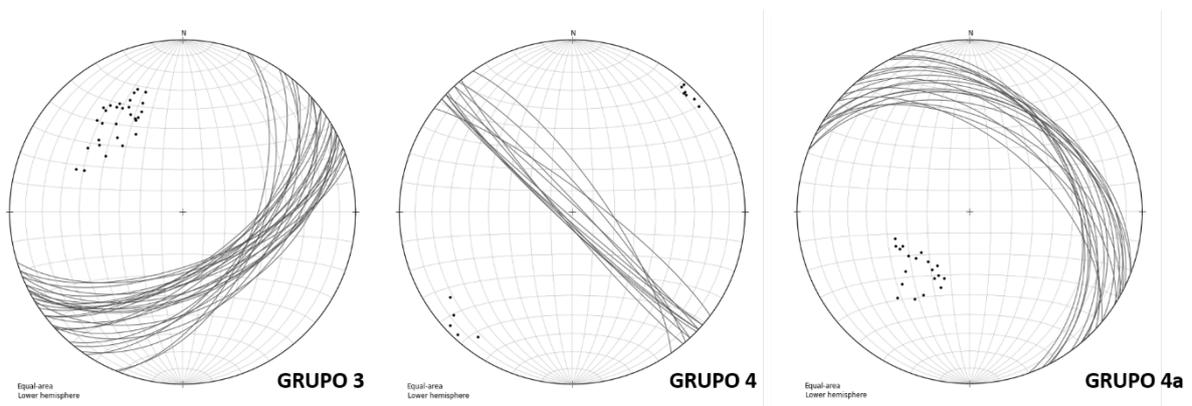


Figura 24 - Representação das estruturas dos grupos 3, 4 e 4a.

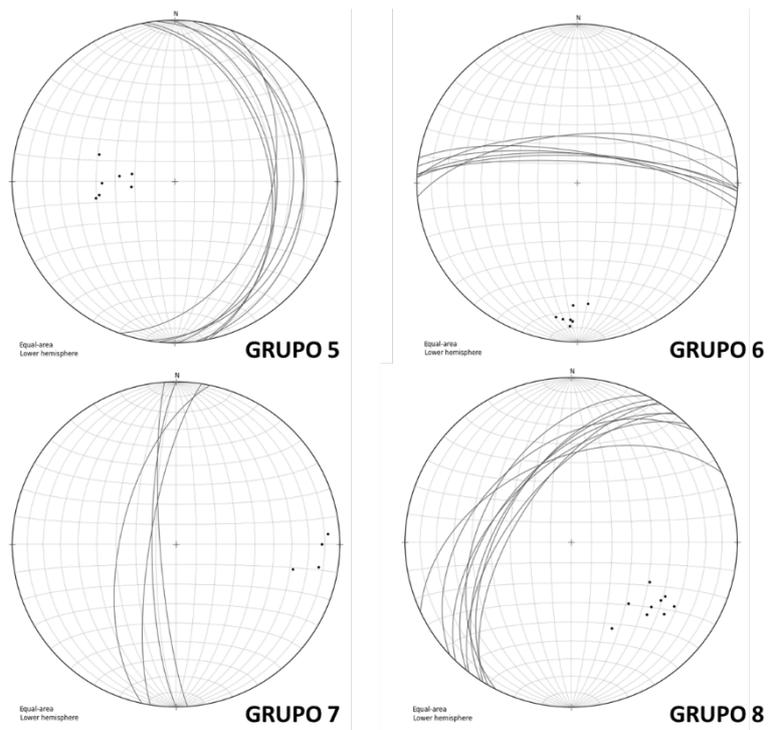


Figura 25 - Representação das estruturas dos grupos 5, 6, 7 e 8.

O grupo 1 é composto por fraturas de baixo ângulo (mergulho médio de 10°), com várias direções. Tem ocorrência por quase todas as sondagens, mas encontra-se com maior adensamento em 70 % das sondagens realizadas. Este grupo está bastante associado a fraturas de encaixe de veios e ocorre preferencialmente nas porções superiores do maciço (até 20 metros de profundidade). As quantidades de fraturas deste grupo, com a correção pelo método de Terzaghi (1965), são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Caracterização das estruturas do grupo 1.

Ponto*	Mergulho médio (graus)	Fraturas (un)	Fraturas com $\alpha > 20$ (un)	Fraturas após correção de Terzaghi	Intervalo (m)	Espaçamento médio no intervalo da sondagem (m)	Tipo de espaçamento no intervalo da sondagem
5716	9	9	9	9,13	13,90	1,52	Regular variada
5745	11	16	16	16,35	1,32	0,08	Concentrada
5691	10	24	24	24,43	26,80	1,10	Aleatório
5678	8	6	6	6,07	6,50	1,07	Regular Variada
5677	10	7	7	7,11	8,80	1,24	Regular Variada
5638	14	7	7	7,28	23,10	3,17	Aleatório
5637	9	16	7	16,24	20,80	1,28	Aleatório
5672	9	13	13	13,20	24,90	1,89	Aleatório
5631	15	20	20	24,23	26,20	1,08	Aleatório
5624	5	4	4	4,02	3,00	0,75	Regular Variada
5621	11	3	3	3,07	10,20	3,32	Aleatório

* As sondagens inclinadas (ângulo superior a 5 graus com a vertical) estão em negrito.

O grupo 2 é representado por estruturas de direção NE-SW, de alto ângulo ($> 65^\circ$); ocorrem, em sua maioria, com mergulhos para SE. São estruturas que ocorrem em 43% das sondagens estudadas e ocorrem preferencialmente sob a forma regular variada dentro do intervalo da sondagem. Como ocorre em apenas 43% das sondagens, o espaçamento real é muito maior do que o observado nas sondagens em que foi amostrada. O grupo 2 está associado à foliação regional de alto mergulho, sendo preferencialmente observado em porções com intensa gnaissificação. As quantidades de fraturas deste grupo, com a correção pelo método de Terzaghi (1965), são apresentadas na Tabela 7.

O grupo 3 é representado por fraturas de direção NE-SW, com mergulhos intermediários para SE (entre 30° e 60°). São estruturas bastante presentes no traçado estudado, ocorrendo em 63% das sondagens estudadas. Considerando apenas os intervalos das sondagens em que foi observada, o espaçamento médio destas estruturas é

de 0,93 m, sob a forma regular variada a concentrada, todavia, por estar presente em apenas 63% das sondagens, o espaçamento real das fraturas deste grupo é muito maior do que o observado nas sondagens em que foi amostrada. Embora as estruturas do grupo 3 sejam preferencialmente de mergulho para SE. As quantidades de fraturas deste grupo, com a correção pelo método de Terzaghi (1965), são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 7 - Caracterização das estruturas do grupo 2.

Ponto*	Mergulho médio (graus)	Fraturas (un)	Fraturas com a>20 (un)	Fraturas após correção de Terzaghi	Intervalo (m)	Espaçamento médio no intervalo da sondagem (m)	Tipo de espaçamento no intervalo da sondagem
5691	73 (SE)	9	4	15,18	26,90	não calculado	Regular Variada
5691	71 (NW)	19	8	40,98	17,46	não calculado	Aleatório
5677	81 (SE)	13	13	13,00	8,40	0,65	Regular Variada
5677	67 (NW)	6	4	11,21	0,50	0,04	Concentrada
5675	79 (SE)	33	5	40,36	14,90	não calculado	Regular Variada
5675	77 (NW)	13	2	15,94	18,20	não calculado	Regular Variada
5674	75 (SE)	14	3	17,78	11,30	não calculado	Regular Variada
5672	78 (SE)	7	0	7,00	22,20	não calculado	Regular Variada
5662	76 (SE)	5	1	7,00	31,10	não calculado	Aleatória
5621	72 (SE)	7	2	10,08	10,10	não calculado	Regular Variada

* As sondagens inclinadas (ângulo superior a 5 graus com a vertical) estão em negrito.

Tabela 8 - Caracterização das estruturas do grupo 3.

Ponto*	Mergulho médio (graus)	Fraturas (un)	Fraturas com a>20 (un)	Fraturas após correção de Terzaghi	Intervalo (m)	Espaçamento médio no intervalo da sondagem (m)	Tipo de espaçamento no intervalo da sondagem
5718	55	3	3	7,37	0,20	0,03	Concentrado
5716	39	2	2	2,74	2,50	0,91	Concentrada
5745	58	11	11	21,62	6,70	0,31	Aleatório
5691	50	19	19	30,80	6,70	0,22	Regular Variada
5678	47	3	3	5,05	6,70	1,33	Aleatório
5637	51	30	30	52,74	6,70	0,13	Regular Variada
5672	56	20	20	37,03	21,30	0,58	Regular Variada
5631	39	4	4	7,55	16,60	2,20	Aleatório
5665	57	4	4	7,98	16,70	2,09	Aleatório
5624	37	8	8	10,13	15,00	1,48	Concentrada

* As sondagens inclinadas (ângulo superior a 5 graus com a vertical) estão em negrito.

O grupo 4 é representado por estruturas de direção NW-SE, de alto ângulo (> 65°), com mergulhos para NE e SW, e ocorrem em 56% das sondagens estudadas. Dentro dos intervalos das sondagens, ocorrem por vezes com distribuição regular variada, mas em sua maioria são registradas ocorrências aleatórias. A alta quantidade de fraturas com α menor que 20 graus implica na não obtenção do espaçamento médio deste grupo. As quantidades de fraturas deste grupo, com a correção pelo método de Terzaghi (1965), são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Caracterização das estruturas do grupo 4.

Ponto*	Mergulho médio (graus)	Fraturas (un)	Fraturas com $\alpha > 20$ (un)	Fraturas após correção de Terzaghi	Intervalo (m)	Espaçamento médio no intervalo da sondagem (m)	Tipo de espaçamento no intervalo da sondagem
5718	74 (NE)	6	0	6,00	10,00	não calculado	Regular variada
5718	81 (SW)	3	1	4,95	11,43	não calculado	Aleatório
5745	76 (NE)	2	0	2,00	0,30	0,15	Concentrada
5691	73 (NE)	5	1	6,72	0,30	não calculado	Regular Variada
5691	74 (SW)	2	0	2,00	16,70	não calculado	Aleatório
5678	82 (NE)	5	0	5,00	6,80	não calculado	Aleatório
5678	85 (SW)	7	0	7,00	3,50	não calculado	Aleatório
5675	76 (SW)	7	2	10,15	4,30	não calculado	Aleatório
5638	54 (NE)	7	7	12,51	21,80	1,74	Aleatório
5672	68 (NE)	14	6	20,08	24,60	não calculado	Aleatório
5665	75 (NE)	7	2	9,83	5,6	não calculado	Regular Variada
5621	60 (NE)	6	6	12,68	13,00	1,03	Regular Variada

* As sondagens inclinadas (ângulo superior a 5 graus com a vertical) estão em negrito.

O sub-grupo 4a tem as mesmas características do seu grupo, entretanto, ocorre com mergulhos menores (em média de 42°) e quase que exclusivamente com rumos para NE. Ocorre em 38% das sondagens. Nas análises de estereogramas, é comum a união das concentrações de polos entre estes, o que permite a união dentro de um mesmo grupo. O espaçamento médio destas estruturas dentro do intervalo compreendido pelas sondagens em que foi amostrada é de 0,98 m com ocorrência é regular variada, todavia, a baixa quantidade de sondagens em que foi amostrada indica que o espaçamento real é muito maior e mais irregular. As quantidades de fraturas deste grupo, com a correção pelo método de Terzaghi (1965), são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Caracterização das estruturas do grupo 4a.

Ponto*	Mergulho médio (graus)	Fraturas (un)	Fraturas com a>20 (un)	Fraturas após correção de Terzaghi	Intervalo (m)	Espaçamento médio no intervalo da sondagem (m)	Tipo de espaçamento no intervalo da sondagem
5718	44	6	6	10,74	13,08	1,22	Regular variada
5716	35	5	5	6,14	0,31	0,05	Concentrada
5691	45	9	9	13,24	16,70	1,26	Regular Variada
5674	58	5	4	8,18	16,70	2,04	Regular Variada
5672	32	20	20	24,08	23,90	0,99	Aleatório
5665	39	15	15	20,35	6,30	0,31	Regular Variada

* As sondagens inclinadas (ângulo superior a 5 graus com a vertical) estão em negrito.

O grupo 5 tem ocorrência em menos de 20% das perfilagens. É representado por estruturas de direção N-S, com mergulhos intermediários (entre 25° a 50°) para leste. O seu espaçamento médio real é bastante elevado, visto que foi observada em poucas sondagens. A sua baixa ocorrência dificulta a definição de padrão de espaçamento, todavia, dentro das sondagens foram observadas ocorrências aleatória e regular variada. As quantidades de fraturas deste grupo, com a correção pelo método de Terzaghi (1965), são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Caracterização das estruturas do grupo 5.

Ponto*	Mergulho médio (graus)	Fraturas (un)	Fraturas com a>20 (un)	Fraturas após correção de Terzaghi	Intervalo (m)	Espaçamento médio no intervalo da sondagem (m)	Tipo de espaçamento no intervalo da sondagem
5718	33	7	7	9,76	14,73	1,51	Aleatório
5691	25	5	5	5,58	25,00	4,48	Aleatório
5638	51	14	14	23,31	24,10	1,03	Regular Variada

* As sondagens inclinadas (ângulo superior a 5 graus com a vertical) estão em negrito.

O grupo 6 é representado por estruturas de alto ângulo (preferencialmente maiores do que 60°), direção E-W com mergulho para norte. Possui espaçamento significativo e irregular. As quantidades de fraturas deste grupo, com a correção pelo método de Terzaghi (1965), são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Caracterização das estruturas do grupo 6.

Ponto*	Mergulho médio (graus)	Fraturas (un)	Fraturas com a>20 (un)	Fraturas após correção de Terzaghi	Intervalo (m)	Espaçamento médio no intervalo da sondagem (m)	Tipo de espaçamento no intervalo da sondagem
5691	71	6	3	11,33	16,50	não calculado	Regular Variada
5675	75	9	2	12,24	15,60	não calculado	Aleatório
5631	57	7	2	10,33	19,58	não calculado	Aleatório
5665	73	7	2	9,81	2,50	não calculado	Concentrada
5624	74	3	1	4,67	24,00	5,14	Aleatória

* As sondagens inclinadas (ângulo superior a 5 graus com a vertical) estão em negrito.

O grupo 7 foi observado claramente é uma única sondagem e se apresentou como estruturas de alto ângulo de direção N-S. As quantidades de fraturas deste grupo, com a correção pelo método de Terzaghi (1965), são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Caracterização das estruturas do grupo 7.

Ponto	Mergulho médio (graus)	Fraturas (un)	Fraturas com a>20 (un)	Fraturas após correção de Terzaghi	Intervalo (m)	Espaçamento médio no intervalo da sondagem (m)	Tipo de espaçamento no intervalo da sondagem
5718*	75	4	0	4,00	17,52	não calculado	Regular variada

* Sondagem inclinada.

O grupo 8 é representado por estruturas de direção NE-SW, com mergulhos intermediários (30° a 65°) para NW. É observado em 50% das sondagens, com espaçamentos bastante irregulares. Este grupo apresenta grande dispersão nos valores de direção. As quantidades de fraturas deste grupo, com a correção pelo método de Terzaghi (1965), são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Caracterização das estruturas do grupo 8.

Ponto*	Mergulho médio (graus)	Fraturas (un)	Fraturas com $\alpha > 20$ (un)	Fraturas após correção de Terzaghi	Intervalo (m)	Espaçamento médio no intervalo da sondagem (m)	Tipo de espaçamento no intervalo da sondagem
5638	53	10	10	17,45	15,50	0,89	Aleatório
5637	38	22	22	29,27	21,50	0,73	Regular Variada
5672	34	6	6	7,27	23,50	3,23	Regular Variada
5631	48	5	3	8,43	0,40	0,05	Concentrada
5665	50	15	11	19,77	14,77	0,75	Aleatória
5624	65	4	3	7,58	16,00	2,11	Aleatória
5662	35	4	4	4,96	11,00	2,22	Aleatória
5621	48	4	4	6,07	20,90	3,44	Regular Variada

* As sondagens inclinadas (ângulo superior a 5 graus com a vertical) estão em negrito.

A Tabela 15 apresenta um quadro resumo dos grupos de fraturas observadas.

Tabela 15 – Quadro resumo dos grupos de fraturas.

Grupo		% de sondagens em que ocorre	Quantidade de fraturas	Espaçamento médio no intervalo da sondagem (m)
baixo ângulo	G1	70	131	1,37
NE / alto ângulo	G2	43	178	não calculado
NE / intermediária	G3	63	183	1,61
NW >65°	G4	56	99	não calculado
NW/ intermediária	G4a	38	83	0,97
N-S / intermediária	G5	20	38	2,4
E-W / alto ângulo	G6	30	48	não calculado
N-S / alto ângulo	G7	5	4	não calculado
NW / intermediária	G8	50	101	1,67

Os estereogramas de cada ponto de sondagem onde foi realizada a perfilagem óptica, com as fraturas corrigidas pelo método de Terzaghi (1965) são apresentados a seguir (Figuras 26 a 41).

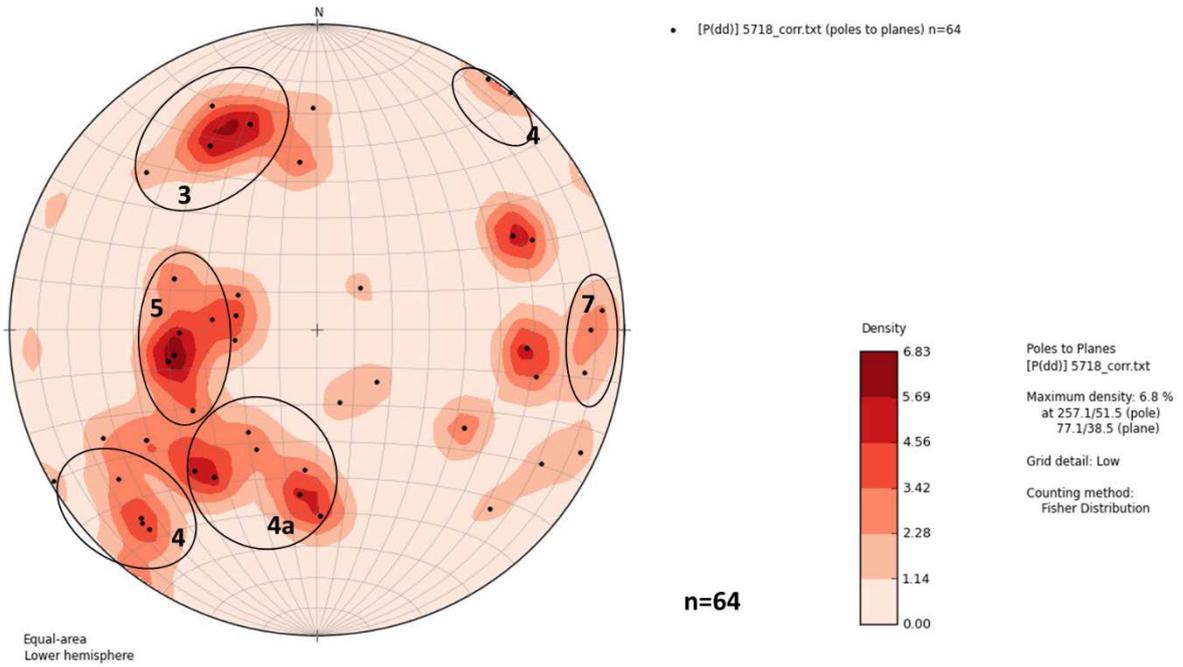


Figura 26 - Estereograma da sondagem 5718 com a correção de Terzaghi (1965).

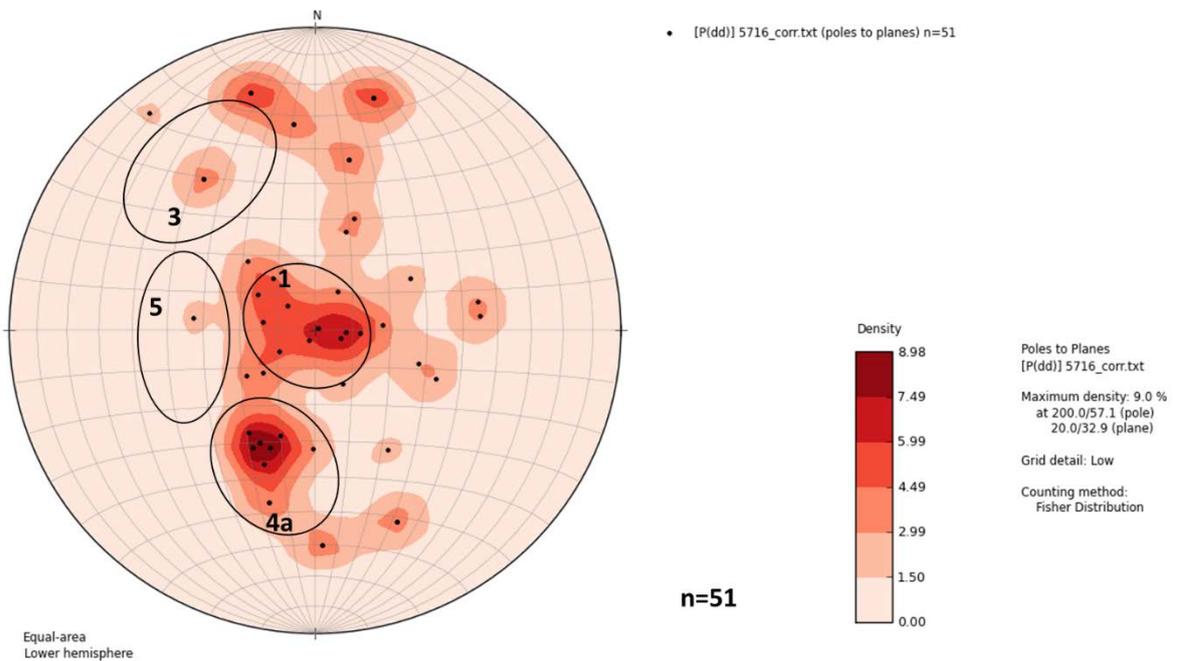


Figura 27 - Estereograma da sondagem 5716 com a correção de Terzaghi (1965).

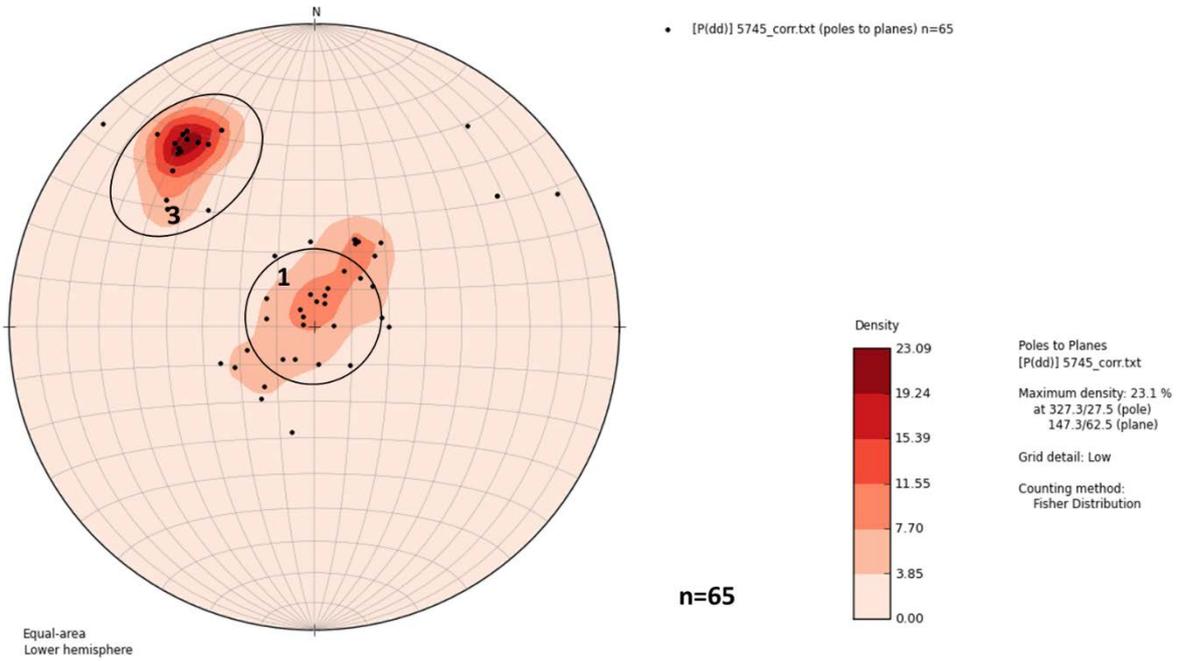


Figura 28 - Estereograma da sondagem 5745 com a correção de Terzaghi (1965).

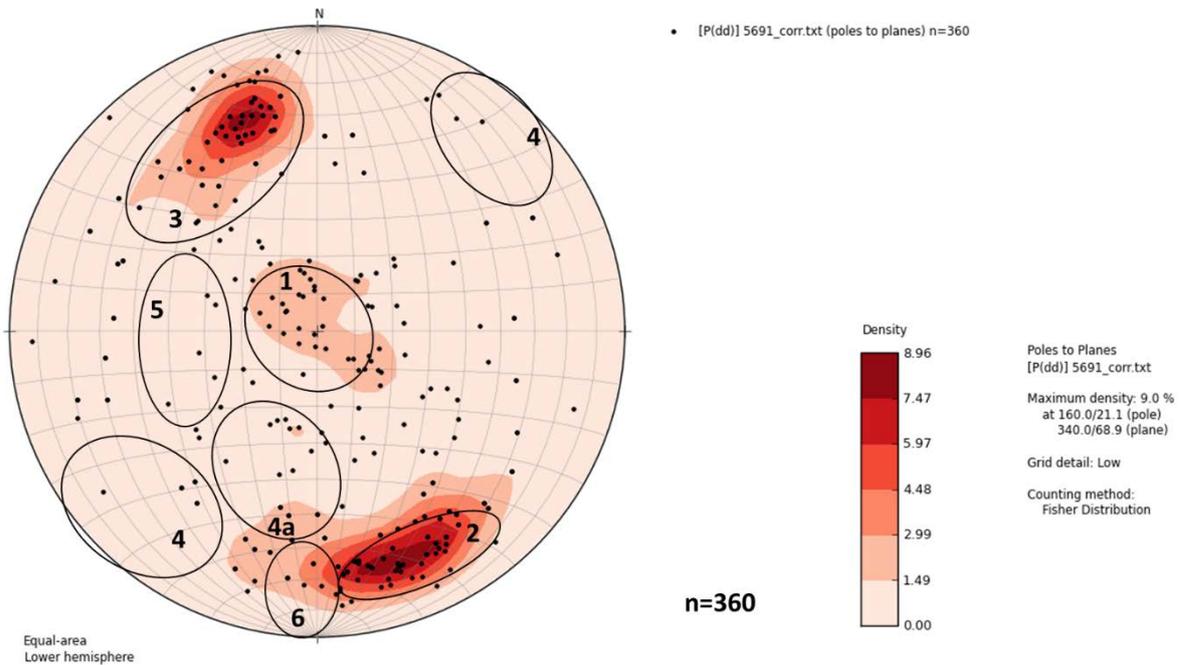


Figura 29 - Estereograma da sondagem 5691 com a correção de Terzaghi (1965).

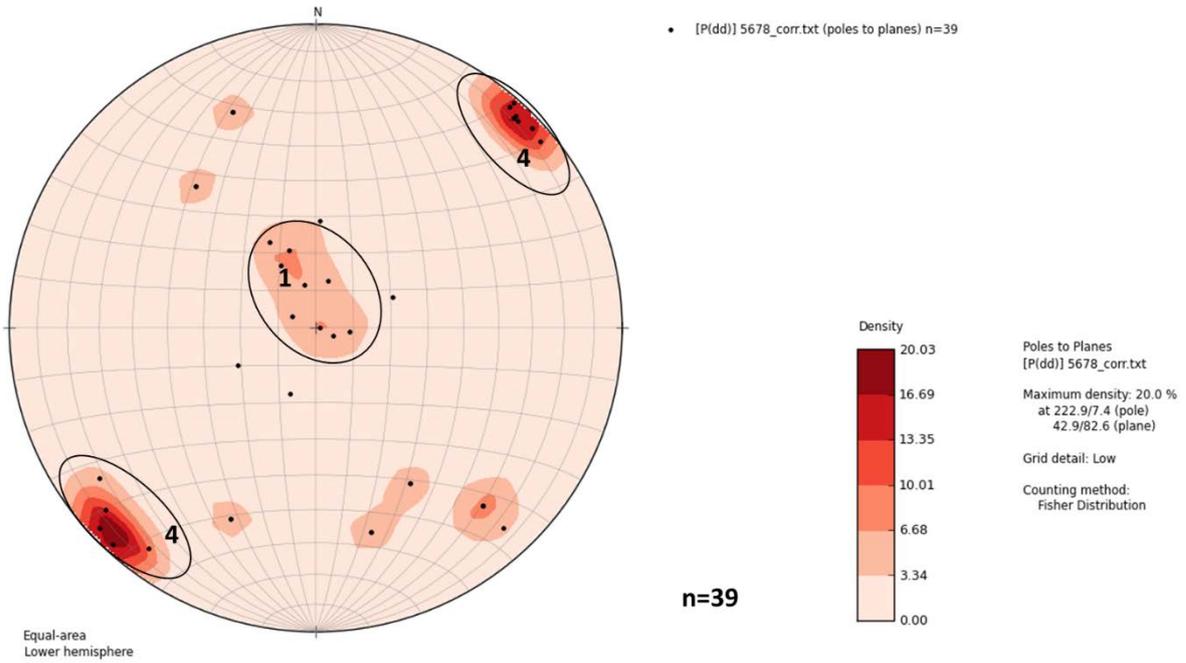


Figura 30 - Estereograma da sondagem 5678 com a correção de Terzaghi (1965).

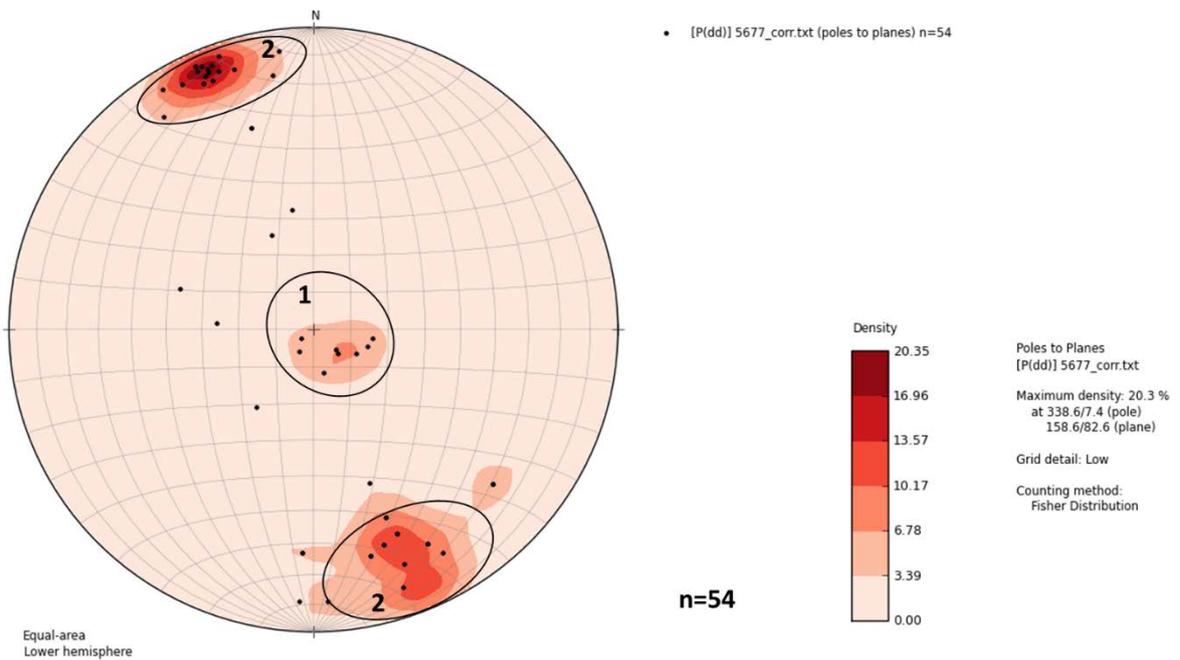


Figura 31 - Estereograma da sondagem 5677 com a correção de Terzaghi (1965).

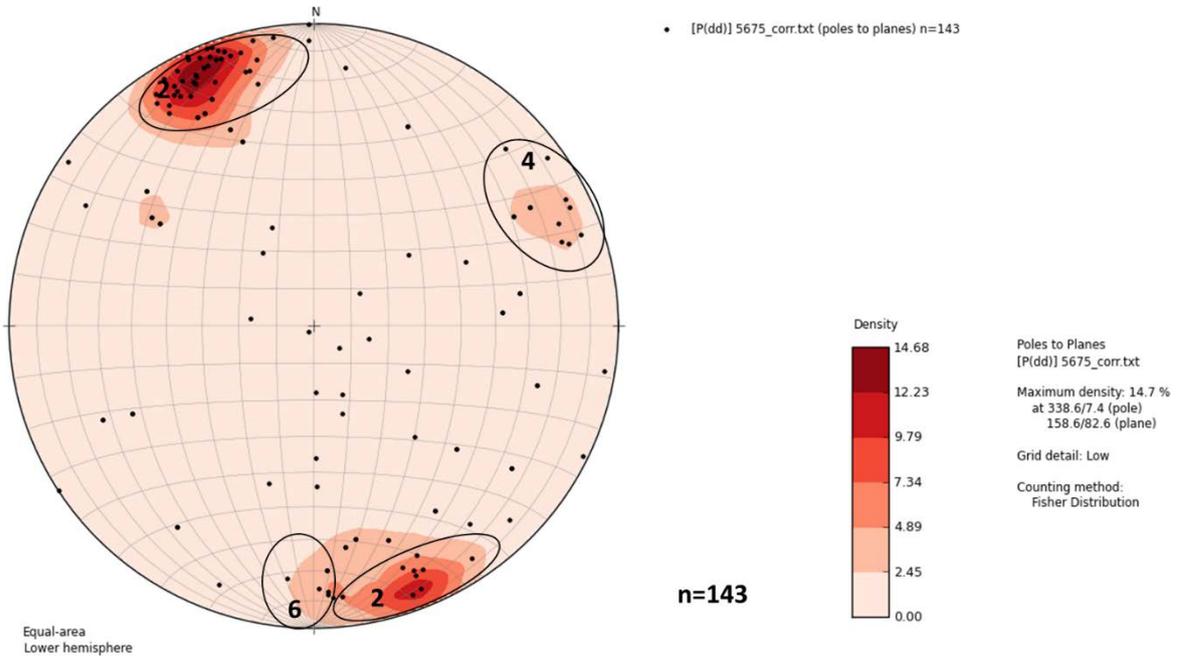


Figura 32 - Estereograma da sondagem 5675 com a correção de Terzaghi (1965).

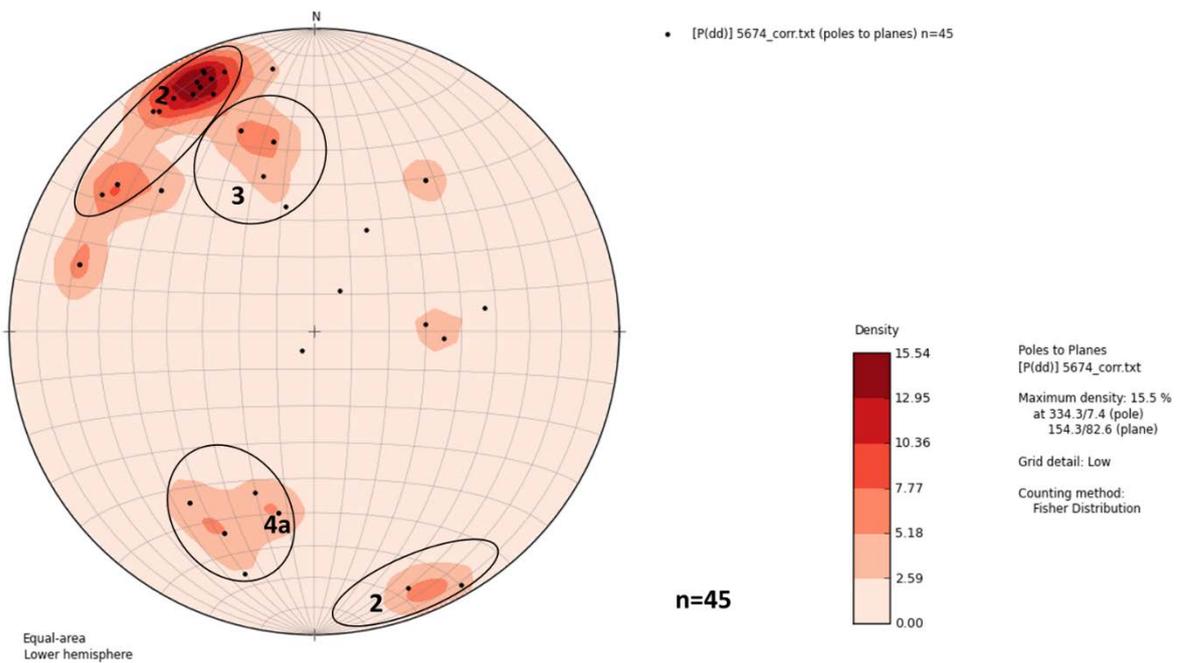


Figura 33 - Estereograma da sondagem 5674 com a correção de Terzaghi (1965).

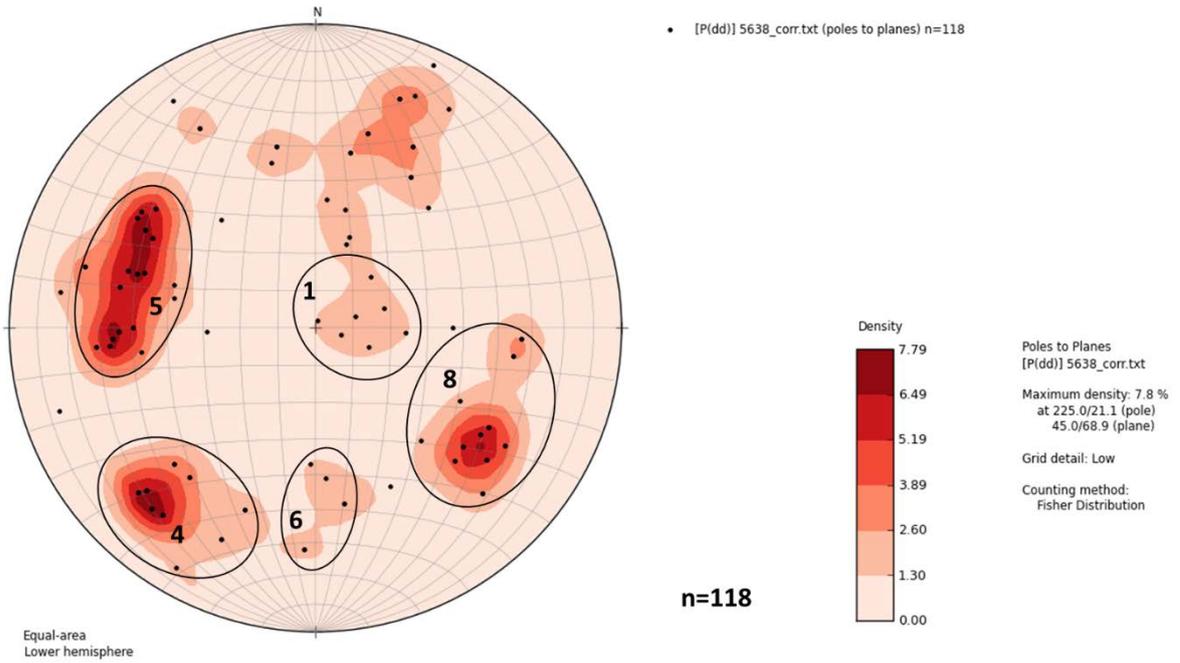


Figura 34 - Estereograma da sondagem 5638 com a correção de Terzaghi (1965).

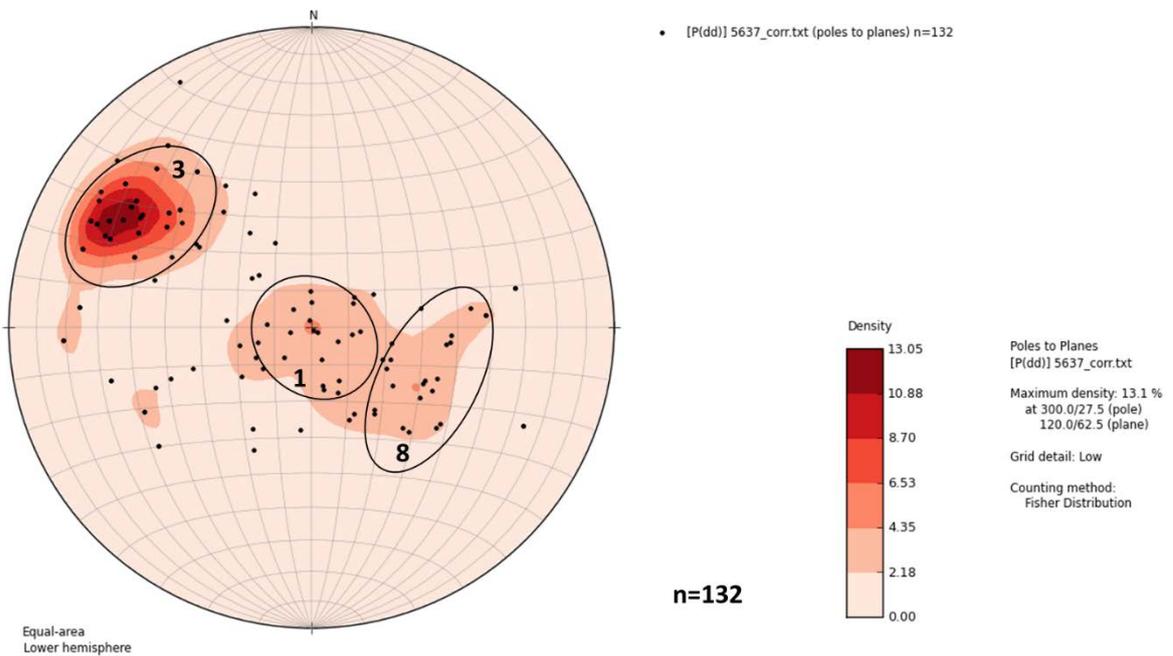


Figura 35 - Estereograma da sondagem 5637 com a correção de Terzaghi (1965).

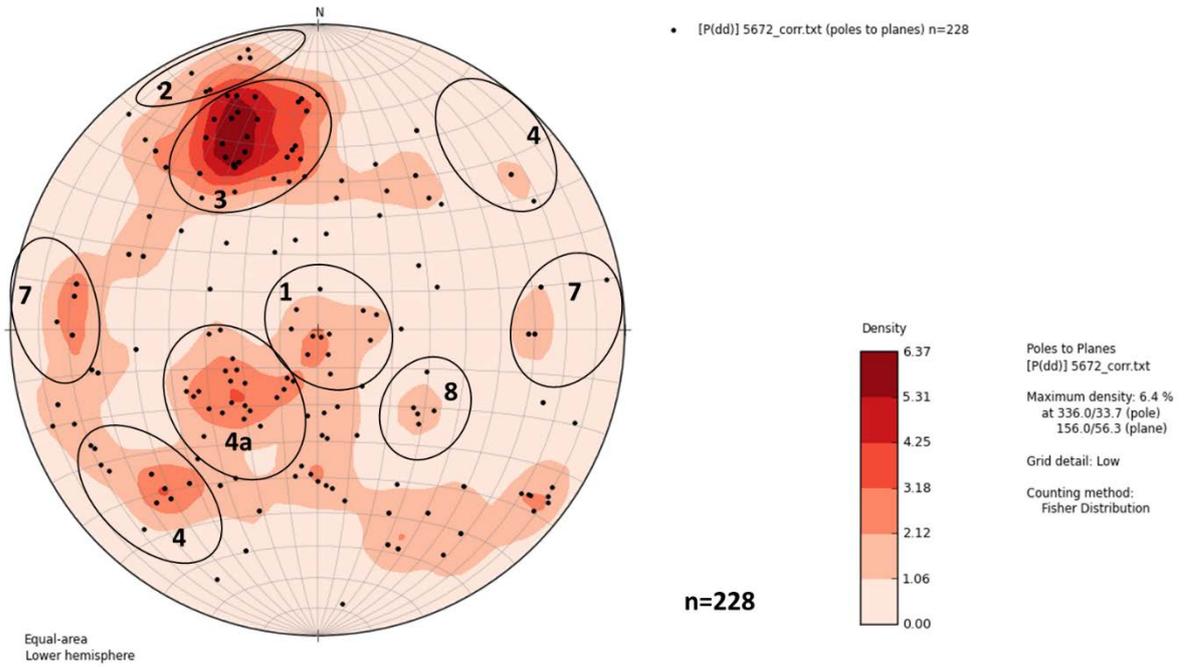


Figura 36 - Estereograma da sondagem 5672 com a correção de Terzaghi (1965).

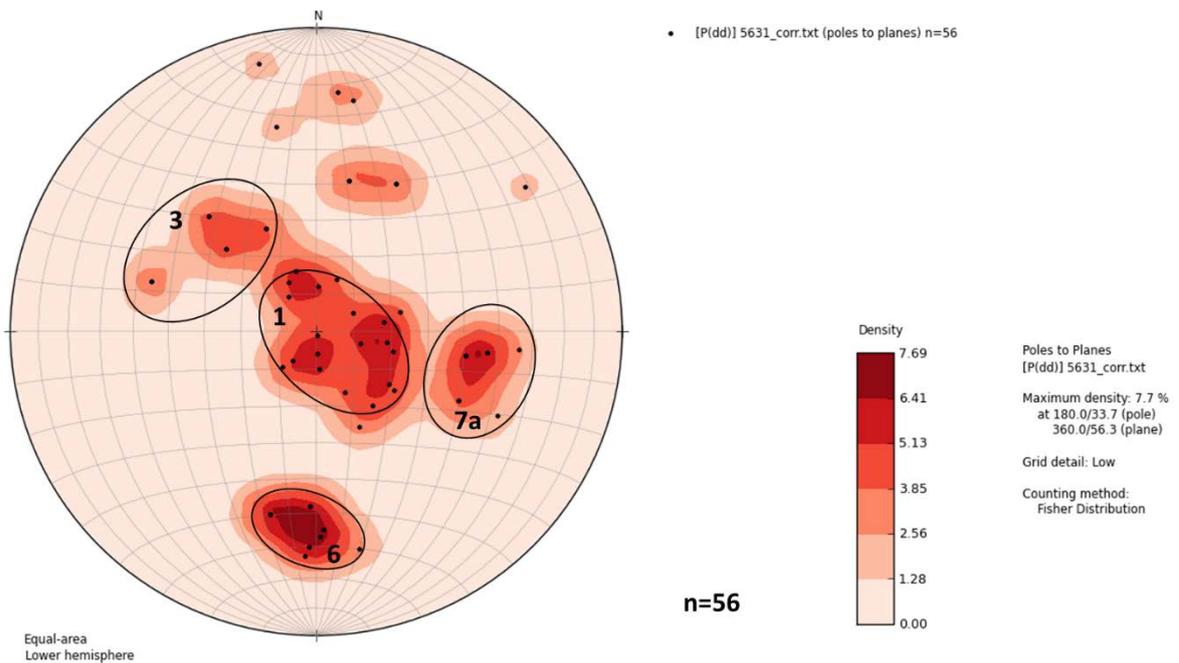


Figura 37 - Estereograma da sondagem 5631 com a correção de Terzaghi (1965).

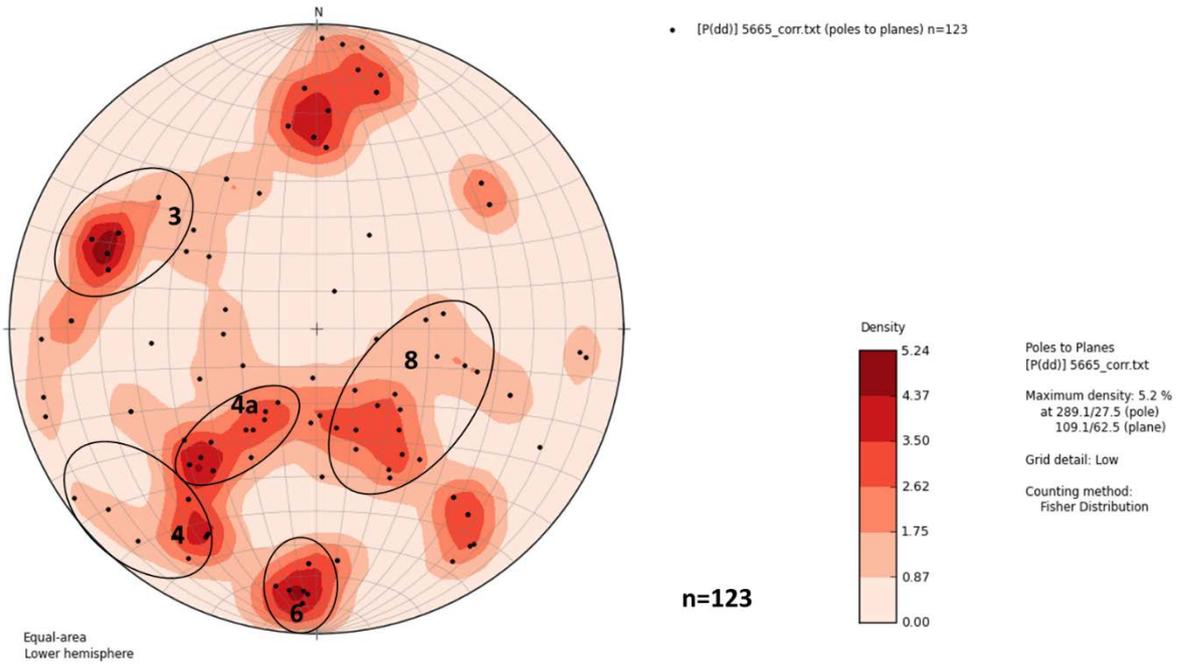


Figura 38 - Estereograma da sondagem 5665 com a correção de Terzaghi (1965).

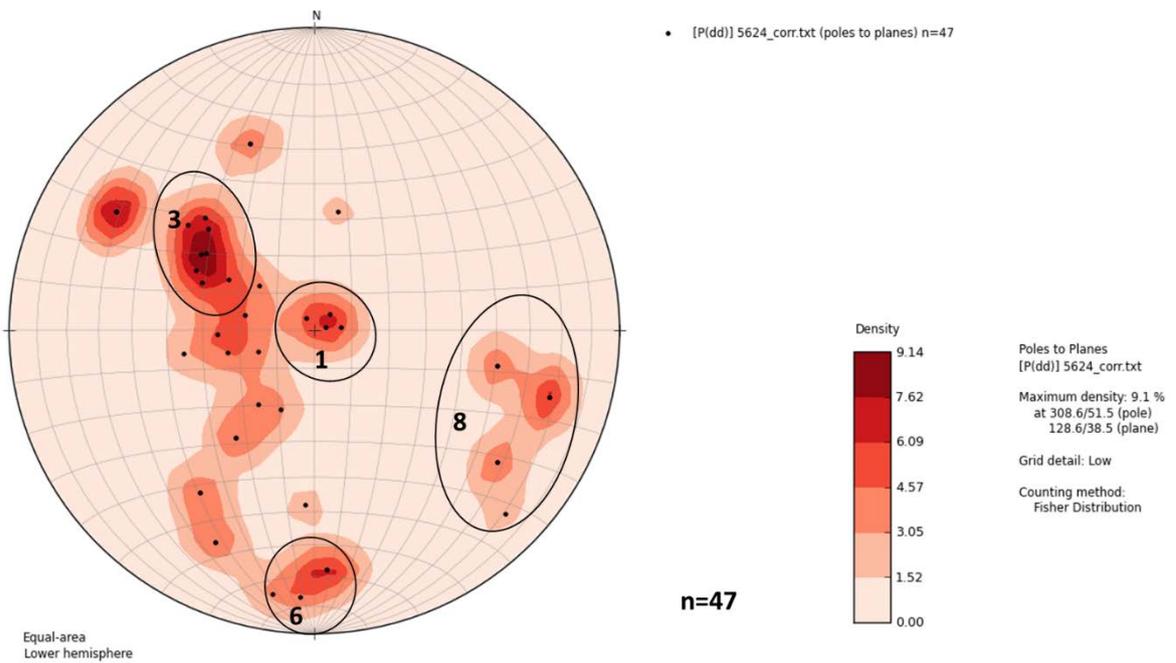


Figura 39 - Estereograma da sondagem 5624 com a correção de Terzaghi (1965).

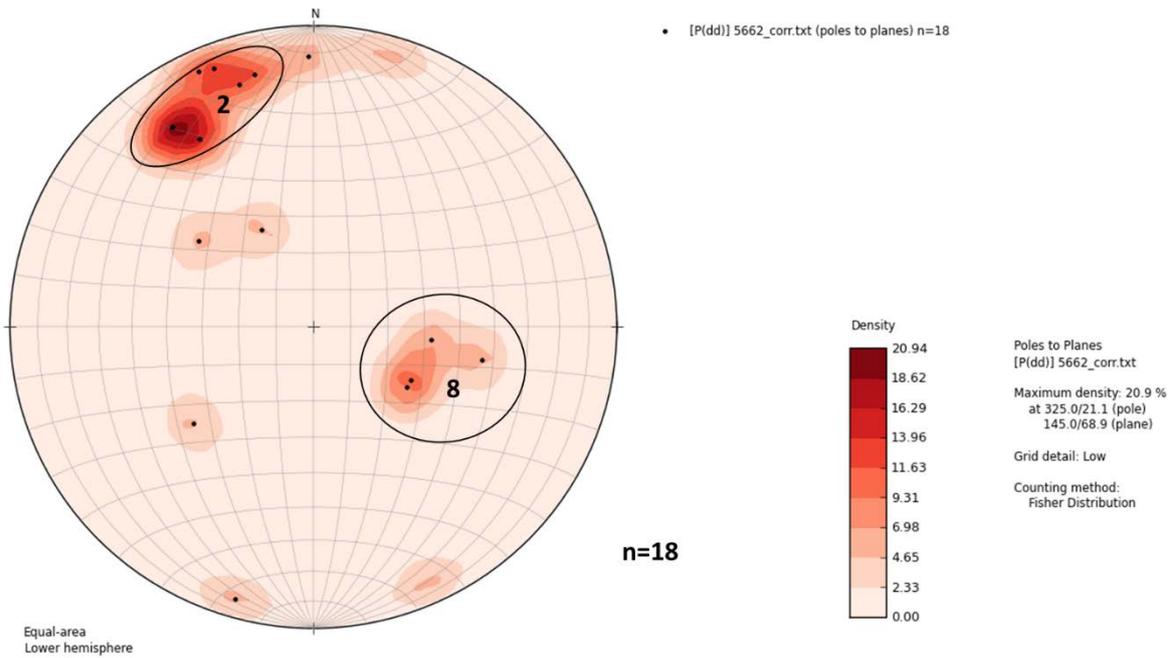


Figura 40 - Estereograma da sondagem 5662 com a correção de Terzaghi (1965).

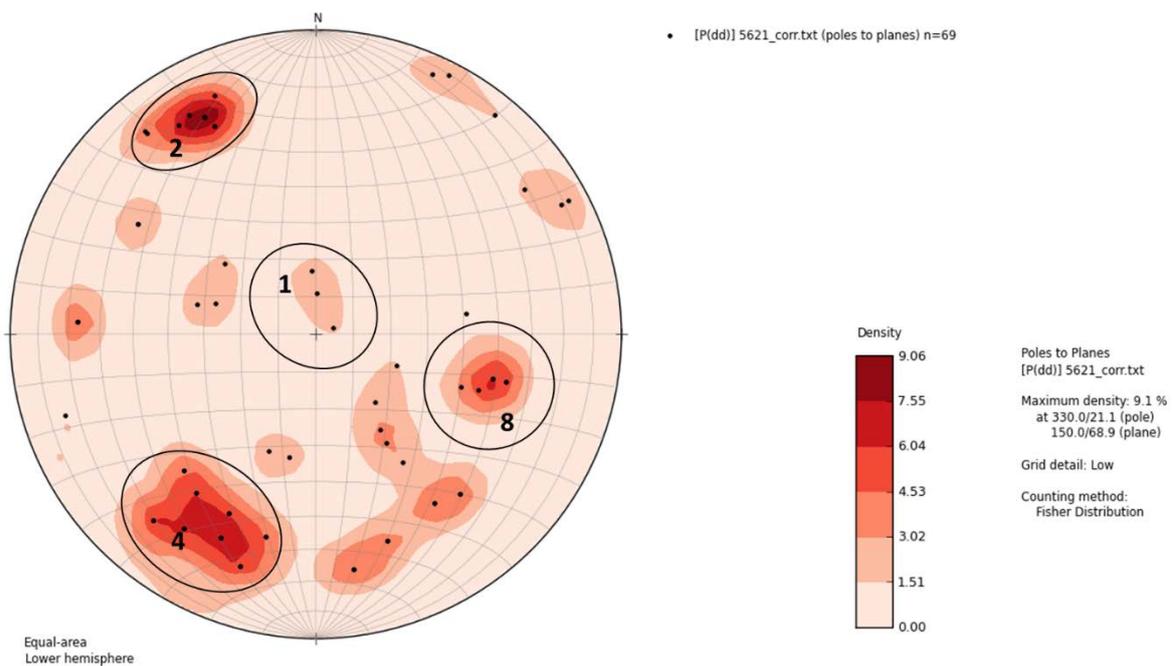


Figura 41 - Estereograma da sondagem 5621 com a correção de Terzaghi (1965).

Na perfilagem óptica, além da identificação das estruturas, foram identificados os intervalos com feições que apresentaram potencial de ocorrência de fluxo. O Anexo 1 apresenta as imagens das estruturas observadas.

7.1.1. Modelo para descrição de estruturas associadas ao fluxo de água subterrânea

No contexto da execução de obras subterrâneas em maciços rochosos, é imperativo que o profissional envolvido realize uma sucinta descrição, ponto a ponto, relacionando os intervalos de ocorrência de fraturamentos mais intensos, bem como a presença de feições associadas ao fluxo de água subterrânea. É importante o registro destas feições, indicando profundidade, cota e a que grupos de estruturas estão relacionadas. A seguir é apresentado um modelo de descrição destas estruturas, que pode ser aplicado nos levantamentos geológicos em projetos de obras subterrâneas.

- Sondagem 5718

Sondagem sub-vertical, com inclinação de 10° com a vertical e com 52,10 m de profundidade. O topo rochoso é observado em 28,90 m, após a passagem por unidade saprolítica. Observa-se um trecho de forte alteração, desde o topo rochoso, até 30,6 m de profundidade com a presença de uma fratura do Grupo 1, direção E-W, de baixo mergulho e com abertura aparente. Após este trecho de intensa alteração, a rocha adquire aspecto são.

Com 33,10 m de profundidade é observada uma fratura do Grupo 7, com abertura aparente e presença de resíduos de perfuração. Entre 34,8 m e 35,4 m é observado um trecho com evidência de alteração; este trecho possui algumas fraturas aparentemente fechadas, de baixo ângulo, e uma fratura E-W de ângulo intermediário e abertura aparente. Em 35,5 m é observado um conjunto de fraturas do Grupo 4 (NW, de alto ângulo) com oxidação das bordas e aparente material de preenchimento, sem ocorrência de alteração nas paredes adjacentes; estas estruturas do Grupo 4 são observadas até a profundidade de 40 m.

Entre 37,5 m e 39,5 m são observados dois veios de baixo ângulo. No encaixe destes veios há fraturas de abertura aparente do Grupo 1 com fina película de oxidação e presença de resíduos de lavagem da perfuração. Na porção em que estas fraturas são interceptadas por fraturas de alto ângulo do Grupo 4 nota-se o aumento da alteração do maciço. Entre 40,0 m e 49,0 m apenas são observadas fraturas aparentemente fechadas, salvo na profundidade de 45,5 m – 46,0 m, onde são observadas duas fraturas do Grupo 4, com abertura aparente e presença de película de oxidação. Novo conjunto de fraturas é observado entre 49,0 e 50,0 m de profundidade, com a presença de uma fratura do Grupo 5

(N-S, de mergulho intermediário), com abertura aparente e preenchimento por resíduos da perfuração.

Faturas do Grupo 3 foram observadas nesta sondagem, mas sem evidência de abertura aparente ou de percolação de água (película de oxidação ou alteração das paredes adjacentes). Um resumo com os horizontes em que foram observadas estruturas e feições geológicas potencialmente condutoras de água é apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5718.

Ponto 5718	km da via: 0,08				
Profundidade (m)	Cota (m)	Condição do Maciço	Fraturas Presentes	Condição das Fraturas	Descrição Geotécnica dos Testemunhos
28,9	696,15	TOPO ROCHOSO			
28,9 a 30,6	696,15 a 694,45	Intervalo de intensa alteração no maciço	Grupo 1	Abertura Aparente	A4/C4/F4
33,1	691,95	Maciço são	Grupo 7	Abertura Aparente	A1/C1/F2
34,8 a 35,4	690,25 a 689,65	Aumento da alteração no maciço	Grupo 1 e E-W de alto ângulo	Abertura Aparente	A1/C1/F3
35,5 a 37,5	689,55 a 687,55	Maciço são	Grupo 4	Fraturas com película de oxidação	A1/C1/F2
37,5 a 39,5	687,55 A 685,55	Intervalo com aumento da alteração no maciço	Grupo 4 em interação com Grupo 1	Abertura Aparente c/ oxidação	A2/C1/F3
45,5 a 46	679,55 a 679,05	Maciço são	Grupo 4	Abertura Aparente c/ oxidação	A3/C2/F3
49 a 50	676,05 a 675,05	Maciço são	Grupo 5	Abertura Aparente	A2/C1/F3
55,11	669,94	FIM DA SONDAGEM			

- Sondagem 5716

Sondagem vertical, junto à marginal do Rio Tietê. O topo rochoso é encontrado em 40,09 m e o perfil rochoso começa com rocha extremamente alterada, até a profundidade de 43,3 m; nesta profundidade passa a ser possível a identificação das estruturas da rocha. Entre a profundidade supracitada, até 44,5 m há um grande trecho de intenso fraturamento, com a observação de fraturas dos grupos 1, 4a e 5; as fraturas do grupo 4a apresentam película de oxidação.

A partir de 45 m as condições de alteração do maciço tornam-se menos intensas até a profundidade de 46,3 m; nesta profundidade há uma fratura do Grupo 3, com abertura aparente e material particulado (provavelmente resíduos de lavagem e perfuração). O maciço permanece em condições sãs até a profundidade de 48,9 m, onde é encontrada outra fratura do Grupo 3, com abertura aparente e preenchimento de material aparentemente fino; nota-se o desenvolvimento de uma camada de maior alteração na rocha com espessura de 10 cm, tanto para cima, como para baixo da estrutura (evidenciada pela perda de coloração da rocha).

Com 51,5 m de profundidade, em meio a um contínuo trecho do maciço em condições sãs, é encontrada uma fratura N-S de mergulho intermediário, com abertura aparente, mas sem evidências de oxidação ou alteração das paredes. O maciço permanece em excelentes condições geotécnicas até a profundidade 58,0 m. Em 57,5 m é observada uma fratura do Grupo 1, com pouca abertura aparente, mas com evidências de oxidação. A partir de 58 m nota-se um discreto aumento das condições de alteração do maciço, com a observação de fraturas do Grupo 3 e algumas fraturas E-W com altos mergulhos para sul.

As demais fraturas observadas nesta sondagem estão com evidências de fechamento e sem indicativos de condução de água subterrânea. Um resumo com os horizontes em que foram observadas estruturas e feições geológicas potencialmente condutoras de água é apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5716.

Profundidade (m)	Cota (m)	Condição do Maciço	Fraturas Presentes	Condição das Fraturas	Descrição Geotécnica dos Testemunhos
Ponto 5716	km da via: 0,16				
40,09	683,78	TOPO ROCHOSO			
40,09 a 43,3	683,78 a 680,57	Intervalo de intensa alteração no maciço, sem preservação de estruturas			
43,3 a 44,5	680,57 a 679,37	Intervalo de intenso fraturamento	Grupos 1, 4a e 5	Fraturas com película de oxidação	A3/C2/F4
46,3	677,57	Maciço são	Grupo 3	Abertura Aparente	A2/C2/F2
48,9	674,97	Maciço são	Grupo 3	Abertura Aparente e camada de alteração.	A2/C2/F3
51,5	672,37	Maciço são	N-S	Abertura aparente	A2/C2/F2
57,5	666,37	Maciço são	Grupo 1	Abertura Aparente c/ oxidação	A2/C2/F3
58 a 59,85	665,87 a 664,02	Intervalo com aumento da alteração no maciço	Grupo 3 e E-W	Fraturas com película de oxidação	A3/C3/F4
59,85	664,02	FIM DA SONDAGEM			

- Sondagem 5745

É uma sondagem vertical a norte do marginal do Rio Tietê. O topo rochoso é encontrado em 13,45 m de profundidade, com o perfil rochoso representado por trecho de intensa alteração e sem preservação de estruturas até 14,5 m. A partir desta profundidade, observa-se um trecho entre 14,5 e 16,0 metros com a presença de fraturas do Grupo 1 com intensa oxidação e abertura aparente, em meio a material bastante fragmentado.

A partir de 16 m o maciço apresenta condições de rocha sã, com a observação de pequenos intervalos de fraturamento. Em 16,6 m é encontrado um conjunto de fraturas do Grupo 3, com abertura aparente e discreto desenvolvimento de alteração nas paredes. Em 17,5 m é observado um conjunto de fraturas do Grupo 1 com intensa oxidação e alteração de paredes.

Após um significativo trecho do maciço em condições sãs, apenas com a presença de estruturas seladas, observa-se em 23,3 m um conjunto de fraturas do Grupo 3 com fina película de oxidação e formação de alteração nas paredes de cerca de 10 cm.

Até o final da sondagem o maciço permanece em condições sãs, salvo no trecho entre 37,3 m e 37,9 m onde é observado um conjunto de fraturas dos Grupos 4 e 1 em interação. Nota-se um significativo preenchimento de sedimento nestas fraturas e o desenvolvimento de um manto de alteração de 15 cm em cada fratura. Ressalta-se que este conjunto com 3 fraturas é a única ocorrência de fraturas do Grupo 4. Esta interação entre as fraturas do Grupo 4 com as fraturas do Grupo 1 também foi observada na sondagem 5718, por sua vez também apresentando evidências de condução de água. Um resumo com os horizontes em que foram observadas estruturas e feições geológicas potencialmente condutoras de água é apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5745.

Profundidade (m)	Cota (m)	Condição do Maciço	Fraturas Presentes	Condição das Fraturas	Descrição Geotécnica dos Testemunhos
Ponto 5745	fora do traçado				
13,45	728,95	TOPO ROCHOSO			
13,45 A 14,5	728,95 a 727,90	Intervalo de intensa alteração no maciço, sem preservação de estruturas			
14,5 A 16	727,90 a 726,40	Intervalo de intenso fraturamento	Grupo 1	Abertura Aparente c/ oxidação intensa	A2/C2/F2
16,6	725,8	Maciço são	Grupo 3	Abertura Aparente e alteração	A2/C2/F3
17,5	724,9	Maciço são	Grupo 1	Intensa oxidação	A2/C2/F3
23,3	719,1	Maciço são	Grupo 3	Oxidação e alteração	A2/C2/F3
37,3 A 37,9	705,10 a 704,50	Maciço são	Grupo 4 em interação com Grupo 1	Abertura Aparente c/ oxidação	A2/C3/F3
42	700,4	FIM DA SONDAGEM			

- Sondagem 5691

Sondagem vertical realizada no canteiro central da Av. Educador Paulo Freire, 35 m distante da margem esquerda do Rio Cabuçu, dentro dos limites do município de Guarulhos. O topo rochoso está em 8,85 m de profundidade e ocorre como rocha extremamente alterada até 10 m de profundidade, onde intercepta um veio quartzo-feldspático. Abaixo deste veio o material melhora em condições geomecânicas, embora ainda esteja bastante alterado. O perfil de alteração da rocha se mantém até 19,2 m, intervalo este em que são observadas algumas estruturas importantes. Entre 11,0 e 13,0 m são observadas fraturas NE, a maioria pertencente ao Grupo 3, com película de oxidação e fragmentação da parede da perfuração, com aspecto de semi-abertura. Entre 14,6 m e 19,1 m há um grande intervalo com a presença de estruturas de alto ângulo, com espaçamento regular, pertencentes ao Grupo 2, com caimento para NW e SE; na intersecção destas estruturas observa-se fragmentação do material e presença da películas de oxidação e alteração intensa e localizada.

No trecho de melhora das condições do maciço são observados alguns conjuntos de fraturas localizados. Em 22,0 m ocorre uma fratura com aspecto de semi-abertura aparente, pertencente ao Grupo 3. O intervalo de 25,5 m a 29,0 possui uma série de fraturas dos Grupos 2 e 6 com película de oxidação, material de preenchimento e alteração localizada, por vezes, cortadas por poucas fraturas do Grupo 1, estas apenas com sinais de alteração nas paredes.

O maciço volta para condições sãs até o intervalo de 32,0 m a 34,0 m, onde é observado um conjunto de estruturas do Grupo 6, com forte alteração do local e aspecto de abertura aparente. Desta profundidade, até o final da sondagem, o maciço retoma condições de pouca alteração, exceto por uma fratura do Grupo 3, em 38,2 m, com presença de oxidação e alteração das paredes do maciço em cerca de 20 cm. Um resumo com os horizontes em que foram observadas estruturas e feições geológicas potencialmente condutoras de água é apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5691.

Ponto 5691	km da via: 0,90				
Profundidade (m)	Cota (m)	Condição do Maciço	Faturas Presentes	Condição das Faturas	Descrição Geotécnica dos Testemunhos
8,85	717,71	TOPO ROCHOSO			
8,85 A 10	717,71 A 716,56	Intervalo de intensa alteração no maciço, sem preservação de estruturas			
11 A 13	715,56 A 713,56	Maciço com alteração	Grupo 3	Abertura Aparente c/ oxidação intensa	A3/C3/F3
14,6 a 19	711,96 A 707,56	Maciço com alteração	Grupo 2	Oxidação e alteração	A3/C3/F4
22	704,56	Maciço são	Grupo 3	Abertura Aparente	A2/C1/F3
25,5 a 29	701,06 A 697,56	Maciço são	Grupos 1, 2 e 6	Oxidação e alteração	A3/C3/F3
32 A 34	694,56 A 692,56	Maciço com alteração	Grupo 6	Abertura Aparente c/ oxidação intensa	A4/C4/F5
38,2	688,36	Maciço com alteração	Grupo 3	Oxidação e alteração	A4/C5/F5
40,06	686,5	FIM DA SONDAGEM			

- Sondagem 5678

Sondagem vertical executada em terreno junto à Av. Educador Paulo Freire, distante cerca de 90 m do Rio Cabuçú. O maciço encontra-se, de maneira geral, em excelentes condições geomecânicas. O topo rochoso está em 7,64 m e não apresenta intervalo de rocha com alteração (contato brusco solo de alteração / rocha sã). Até 14 m são observadas estruturas de baixo ângulo do Grupo 1 com espaçamento regular de 1,5 m, algumas com aspecto de abertura aparente e outras com preenchimento de material pétreo, cortadas por fraturas de alto ângulo do Grupo 4, aparentemente fechadas, mas com alteração em suas paredes.

Observa-se aumento discreto da alteração do maciço entre 15,0 m e 16,0 m, com a presença de fraturas do Grupo 1, aparentemente fechadas, mas com alteração nas paredes e no intervalo de 16, 0 a 17,0 m com estruturas do Grupo 4, também aparentemente fechadas, mas com evidência de alteração nas paredes. Um resumo com os horizontes em que foram observadas estruturas e feições geológicas potencialmente condutoras de água é apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5678.

Ponto 5678	km da via: 1,01				
Profundidade (m)	Cota (m)	Condição do Maciço	Fraturas Presentes	Condição das Fraturas	Descrição Geotécnica dos Testemunhos
7,64	720,08	TOPO ROCHOSO			
7,64 A 14	720,08 A 713,72	Maciço são	Grupo 4 em interação com Grupo 1	Abertura Aparente c/ oxidação	A2/C2/F3
15 A 16	712,72 A 711,72	Maciço pouco alterado	Grupo 1	Alteração	A3/C3/F3
16 A 17	711,72 A 710,72	Maciço pouco alterado	Grupo 4	Oxidação e alteração	A2/C2/F3
18,32	709,4	FIM DA SONDAGEM			

- Sondagem 5677

Sondagem vertical executada na Rua São Pedro, em local com quebra de relevo, com o relevo adquirindo elevação com crista alinhada no sentido NE-SW. O topo rochoso é interceptado em 6,61 m de profundidade com a presença de rocha muito alterada até 7,5 m, onde passa a ser recuperada rocha sã. Em 7,90 m é interceptado um veio sub-horizontal, com fraturas de encaixe aparentemente abertas, pertencente ao Grupo 1.

No intervalo entre 10,0 m e 14,0 m o maciço encontra-se são, com a presença de poucas fraturas dos Grupos 1 e 6, sendo que apenas a do último grupo apresenta abertura aparente e indícios de alteração em suas paredes. Entre 20,0 m e 24,0 m passa a ser

observado um conjunto de estruturas do Grupo 2, paralelas à foliação de alto de grau, algumas com evidência de alteração. Este conjunto é cortado por algumas fraturas do Grupo 1 com evidência de oxidação.

Entre 24,2 m e 25,6 m é observada uma fratura sub-vertical com evidência de oxidação que intercepta um conjunto de fraturas do Grupo 2 com mergulho para NW; nestas fraturas é observada a ocorrência de alteração acentuada e película de oxidação.

Um resumo com os horizontes em que foram observadas estruturas e feições geológicas potencialmente condutoras de água é apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5677.

Profundidade (m)	Cota (m)	Condição do Maciço	Fraturas Presentes	Condição das Fraturas	Descrição Geotécnica dos Testemunhos
Ponto 5677	km da via: 1,13				
6,61	719,79	TOPO ROCHOSO			
6,61 A 7,5	719,79 A 718,90	Intervalo de intensa alteração no maciço, sem preservação de estruturas			
7,9	718,5	Maciço são	Grupo 1 como encaixe de veio	Abertura Aparente	A2/C2/F2
10 A 14	716,40 A 712,40	Maciço são	Grupo 6	Abertura Aparente c/ alteração	A2/C2/F2
20 A 24	706,40 A 702,40	Aumento de alteração no maciço	Grupo 2 em interação com Grupo 1	Alteração (2) e Oxidação (1)	A3/C3/F3
24,2 A 25,6	702,20 A 700,80	Aumento de alteração no maciço	Sub-vertical em interação com Grupo 2	Alteração e Oxidação	A3/C3/F3
30,32	696,08	FIM DA SONDAGEM			

- Sondagem 5675

Sondagem vertical executada na Rua São Pedro, no mesmo alinhamento da sondagem anterior, mas em cota topográfica mais alta. O topo rochoso é interceptado em 14,83 m de profundidade, com o perfil sendo representado como rocha bastante alterada até a profundidade de 16,0 m. A partir de 19,5 m de profundidade, até 26,5 m, são observadas estruturas do Grupo 2, em meio à foliação de alto grau, com significativa alteração em alguns planos, em interação com estruturas de baixo ângulo do Grupo 1, fraturas E-W de mergulho intermediário e fraturas do Grupo 6. As estruturas de médio e alto ângulo apresentam significativa alteração e oxidação. A partir de 26,5 m o maciço adquire características sãs até 31,5 m. Neste intervalo apenas são observadas algumas fraturas de baixo ângulo aparentemente fechadas e uma estrutura do Grupo 3, com abertura aparente e desenvolvimento de uma espessura de 25 cm de alteração. As estruturas do Grupo 2 voltam a ser observadas em 32,5 m e até o final da sondagem. Em 34,5 são observadas fraturas do Grupo 4 e 4a, associadas a um veio com intensa alteração. Um resumo com os horizontes em que foram observadas estruturas e feições geológicas potencialmente condutoras de água é apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5675.

Ponto 5675	km da via: 1,19				
Profundidade (m)	Cota (m)	Condição do Maciço	Fraturas Presentes	Condição das Fraturas	Descrição Geotécnica dos Testemunhos
14,83	718,83	TOPO ROCHOSO			
14,83 A 16,0	a 717,66	Intervalo de intensa alteração no maciço, sem preservação de estruturas			
19,5 A 26,5	714,16 a 707,16	Aumento de alteração no maciço	Grupo 2 em interação com Grupo 1 e E-W de ângulo médio	Grupo 2 e E-W com intensa alteração e oxidação	A3/C2/F4
26,5 A 31,5	707,16 a 702,16	Maciço são	Grupo 3 (isolada)	Abertura Aparente c/ alteração	A2/C2/F2
34,5	699,16	Maciço com alteração	Grupos 4, 4a e 1	Alteração	A2/C2F2
40,04	693,62	FIM DA SONDAGEM			

- Sondagem 5674

Sondagem executada na confluência das ruas São Pedro com Maria Conceição, em topografia mais alta que as anteriores. O topo rochoso é interceptado em 13,90m, com material extremamente alterado até 16,90 m.

A partir de 18,0 m são observadas estruturas do Grupo 2 em meio à foliação, com uma importante intersecção com uma fratura E-W de mergulho intermediário para N, com abertura aparente e alteração das paredes. A estruturação do Grupo 2 supracitada se desenvolve nitidamente por toda a perfuração, com acréscimos de alteração entre 28,5 m e 31,0 m. O intervalo de 31,0 m e 33,0 m possui uma estrutura do Grupo 2, com caimento para NW e características de alteração similares à da foliação; também é observado um veio quartzo-feldspático de 70 cm de espessura, com um fraturamento com abertura aparente, na direção N-S e mergulho intermediário para W.

Um resumo com os horizontes em que foram observadas estruturas e feições geológicas potencialmente condutoras de água é apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5674.

Profundidade (m)	Cota (m)	Condição do Maciço	Fraturas Presentes	Condição das Fraturas	Descrição Geotécnica dos Testemunhos
Ponto 5674	km da via: 1,31				
13,9	730,42	TOPO ROCHOSO			
13,9 A 16,9	730,42 a 727,42	Intervalo de intensa alteração no maciço, sem preservação de estruturas			
18	726,32	Maciço com alteração	Grupo 2 com E-W de médio grau	Abertura aparente e oxidação na E-W	A2/C2/F2
28,5 A 31	715,82 a 713,32	Aumento de alteração no maciço	Grupo 2	Alteração mais intensa	A2/C3/F3
31 A 33	713,32 a 711,32	Maciço são	Grupo 2 e veio com N-S de médio grau	Abertura Aparente (N-S) e alteração (2)	A1/C1/F2
36,18	708,14	FIM DA SONDAGEM			

- Sondagem 5638

Sondagem vertical realizada dentro do Lar Madre Regina, divisor topográfico local. Topo rochoso é interceptado em 23,35 m. Material rochoso extremamente alterado é encontrado até 25,60 m.

Entre 27,5m e 29,5 m é observado um conjunto de sete fraturas de diferentes orientações em meio ao maciço são. As estruturas observadas são dos Grupos 1, 5 e 8 com aspecto de abertura aparente. Um conjunto de estruturas do Grupo 8 volta a ser observado entre 30,5 m e 32,0 m.

Em 34,5 m é observada uma fratura do Grupo 7, com abertura aparente e presença de película de oxidação em meio ao maciço são. Em 36,5 m volta a ser observada uma fratura do Grupo 8. Entre 36,5 e 37,0 m é observado um conjunto de estruturas do Grupo 4a, com intensa alteração e em 37,5 m são observadas estruturas do Grupo 3, também com intensa alteração. O intervalo entre 38,0 e 39,0 é marcado pela presença de uma fratura de alto ângulo do Grupo 2, com alteração das paredes do maciço e oxidação nas paredes da fratura.

No trecho de 41,0 a 43,0 m são observadas poucas fraturas com fechamento aparente e sem evidências de alteração ou oxidação, exceto por uma estrutura do Grupo 5, que apresenta alteração de 15 cm nas paredes do maciço. O intervalo de 44,0 m a 46,0 m apresenta estruturas do Grupo 1 com abertura aparente e fraturas E-W de mergulho médio com presença de película de oxidação. Entre 50,0 m e 51,0 m, em intervalo de aumento da alteração no maciço, é observada uma fratura com abertura aparente, E-W, de mergulho médio, com presença de oxidação nas paredes. Um resumo com os horizontes em que foram observadas estruturas e feições geológicas potencialmente condutoras de água é apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5638.

Ponto 5638	km da via: 1,63				
Profundidade (m)	Cota (m)	Condição do Maciço	Fraturas Presentes	Condição das Fraturas	Descrição Geotécnica dos Testemunhos
23,35	732,54	TOPO ROCHOSO			
23,35 A 25,60	732,54 a 730,29	Intervalo de intensa alteração no maciço, sem preservação de estruturas			
27,5 A 29,5	728,39 726,39	Maciço são	Grupos 1, 5 e 8	Abertura Aparente	A2/C2/F2
30,5 A 32	725,39 a 721,39	Maciço são	Grupo 8	Abertura Aparente	A2/C2/F2
34,5	721,39	Maciço são	Grupo 7	Abertura Aparente	A2/C2/F2
36,5	719,39	Maciço são	Grupo 8	Abertura Aparente	A2/C2/F2
36,5 A 37	719,39 a 718,89	Aumento da alteração no maciço	Grupo 4a	Alteração intensa	A2/C2/F2
37,5	718,39	Pouca alteração	Grupo 3	Alteração	A3/C2/F2
38 A 39	717,89 a 716,89	Aumento da alteração no maciço	Grupo 2	Alteração e Oxidação	A3/C2/F2
41 A 43	714,89 a 712,89	Maciço são	Grupo 5	Alteração	A2/C3/F3
44 A 46	711,89 a 709,89	Maciço são	Grupo 1 e E-W intermediárias	Abertura Aparente (1) e oxidação (E-W)	A2/C2/F2
50 A 51	705,89 a 704,89	Aumento da alteração no maciço	E-W intermediárias	Abertura Aparente e oxidação	A3/C3/F3
56,23	699,66	FIM DA SONDAGEM			

- Sondagem 5637

Sondagem realizada na Rua Luiz Bento Damiani, perpendicular à Avenida Guarulhos. O topo rochoso é interceptado em 17,72 m, com um trecho de rocha extremamente alterada até 18,6 m; desta profundidade, até 35,0 m, são observadas fraturas de grupos diversos, em intervalos de aproximadamente 1 m.

Entre 23,5 m e 24,5 m há um intervalo intensamente alterado e não recuperado pela sondagem; a perfilagem não conseguiu identificar adequadamente as estruturas, mas é possível observar que são preferencialmente de mergulhos baixo a intermediário.

A partir de 35,0 m há uma significativa melhora no maciço, com menos alteração em suas paredes. Até o final da sondagem são observadas fraturas localizadas com alteração nas paredes do maciço. Um resumo com os horizontes em que foram observadas estruturas e feições geológicas potencialmente condutoras de água é apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 - Modelo de descrição de estruturas com potencial de fluxo para o ponto 5637.

Ponto 5637	km da via: 1,81				
Profundidade (m)	Cota (m)	Condição do Maciço	Faturas Presentes	Condição das Faturas	Descrição Geotécnica dos Testemunhos
17,72	727,93	TOPO ROCHOSO			
17,72 A 18,6	727,93 A 727,05	Intervalo de intensa alteração no maciço, sem preservação de estruturas			
19,5 A 21	726,15 A 724,65	Maciço com alteração	Grupo 8	Abertura Aparente e alteração	A3/C3/F2
22 A 23	723,65 A 722,65	Maciço com alteração	Grupo 3	Faturas sem evidência de percolação	A2/C2/F4
23 A 24	722,65 A 721,65	Maciço com alteração	Grupo 5	Alteração intensa	A2/C2/F4
24 A 25	721,65 A 720,65	Maciço com alteração	Grupo 5	Alteração	A2/C2/F2
26,5 A 27,5	719,15 A 718,15	Maciço com alteração	Grupos 1 (encaixe de veio) e 8	Alteração e Oxidação (8)	A2/C2/F3
30 A 31	715,65 A 714,65	Maciço com alteração	N-S médio grau	Faturas sem evidência de percolação	A2/C2/F3
31,5 A 33,5	714,15 A 712,15	Maciço com alteração	Grupos 3 e 4a	Alteração	A2/C2/F3
34 A 35	711,65 A 710,65	Maciço com alteração	Grupos 2 e 3	Alteração e Oxidação	A2/C2/F3
38 A 39	707,65 A 706,65	Maciço são	Grupo 2	Alteração	A2/C2/F2
39,5 A 40,5	706,15 a 705,15	Maciço são	Grupo 3	Faturas sem evidência de percolação	A2/C2/F2
42,5 a 44,5	703,15 a 701,15	Maciço são	Grupo 3	Alteração	A2/C2/F2
45,02	700,63	FIM DA SONDAGEM			

7.1.2. Feições indicativas de fluxo de água subterrânea e grupos de fraturas associados

O levantamento dos dados estruturais e a descrição de feições com potencial de ocorrência de fluxo em imagens da perfilagem óptica e consulta aos testemunhos permite fazer algumas considerações sobre os grupos de estruturas mapeadas.

O Grupo 1 possui maior incidência de estruturas com abertura aparente e está também associado às fraturas de encaixes de veios e em fraturas de alívio próximo ao topo rochoso. Normalmente observam-se ocorrências de oxidação em sua superfície, mas com pouco desenvolvimento de capa de alteração no maciço adjacente. Estas estruturas são muito comuns nas porções próximas ao topo rochoso. Há também uma significativa ocorrência destas estruturas sem evidência de fluxo de água, quando associadas a fraturamentos de veios, nestes casos apenas apresentando indícios de abertura aparente.

As estruturas dos Grupos 2 e 3, NE-SW de alto ângulo e ângulo intermediário respectivamente, são as estruturas com maior índice de ocorrência no maciço estudado. O Grupo 2 está associado à foliação regional com mergulho para SE e desenvolve significativas feições de fluxo, como intensa oxidação de suas superfícies, inclusive com desenvolvimento de capa de alteração no maciço. Por estarem associadas à foliação regional, são mais observadas nas porções onde o maciço apresenta características de rocha gnáissica. É importante mencionar que estas estruturas de alto ângulo ocorrem preferencialmente acima da cota 700 m e abaixo da cota 726 m. O Grupo 3, de ângulo intermediário também apresentou ocorrência bastante importante no maciço e com clara associação a feições de fluxo de água subterrânea, como abertura aparente e significativa formação de capa de alteração no maciço rochoso. O grupo 3 é paralelo à foliação de ângulo intermediário observada com menos destaque na perfilagem óptica e que é pouco perceptível nos testemunhos de sondagens.

As estruturas NW-SE do Grupo 4 (alto ângulo) são estruturas também bastante presentes no maciço. Comparativamente com os grupos supracitados, este grupo apresenta menos feições associadas ao fluxo de água subterrânea. É raro observar formação de capas de alteração ou aberturas aparentes significativas; normalmente apresentam elevada rugosidade e apenas películas de oxidação de ocre a avermelhada em suas superfícies. Observa-se que este grupo tem ocorrência bastante disseminada pelo maciço, ocorrendo em diversos segmentos do maciço e em profundidades variadas. Ainda com relação a estas

estruturas de alto ângulo, é comum a ocorrência de intersecção com estruturas de baixo ângulo do grupo 1 (horizontais a sub-horizontais) sempre manifestando feições indicativas de fluxo. As estruturas de baixo ângulo NW-SE, aqui chamadas de grupo 4a, por sua vez não apresentaram ocorrências significativas de aberturas aparentes, mas estão associadas a trechos de maiores alterações no maciço.

Um outro grupo de estruturas NE-SW de mergulho intermediário, com mergulho para NW, aqui chamadas de grupo 8, foi bastante observada nas porções internas do maciço, ou seja, longe das bordas e grandes falhamentos. Nestas estruturas foram pouco observadas feições associadas ao fluxo de água. Chama a atenção a grande oscilação nas medidas estruturais dentro do intervalo determinado. Normalmente os polos deste grupo são mais espalhados e não coincidindo de uma perfuração para outra.

As estruturas N-S tiveram também importância significativa nos levantamentos, as maiores ocorrências são com mergulhos de baixo e médio grau, mas foram observadas algumas ocorrências de alto ângulo com alteração nas paredes do maciço e oxidações em tons ocres a avermelhados.

As estruturas E-W tiveram pouca ocorrência no maciço e também não apresentaram características importantes relacionadas ao fluxo de água, exceto por ocorrências localizadas de formação de capa de alteração no maciço adjacente.

7.2. ENSAIOS DE PERDA DE ÁGUA SOB PRESSÃO

Com a observação das estruturas com potencial de ocorrência de fluxo de água subterrânea, foram selecionados os intervalos para realização dos ensaios de perda de água sob pressão. Conforme mencionado anteriormente, neste estudo apenas foi adotado o primeiro ciclo (pressão mínima), de modo a garantir que as fraturas sejam ensaiadas sem ocorrência de regimes com deformação das estruturas, ou modificação das condições das fraturas, como por exemplo, remoção de preenchimentos.

A relação de pontos e intervalos ensaiados, as estruturas presentes em cada ensaio, a condição hidráulica observada e as permeabilidades obtidas nos intervalos em que houve consumo de água na injeção são apresentadas na Tabela 26. Ao todo foram realizados 84 ensaios e, destes, 31 apresentaram consumo de água, o que representa 37% do total de ensaios. Em 53 ensaios (63%) não houve consumo, sendo estes considerados como impermeáveis à baixa pressão.

Em 13 intervalos não foi possível a realização dos ensaios por impossibilidade de obturação adequada. A principal razão para esta ocorrência é o elevado grau de alteração das paredes do maciço, que deixa a parede da perfuração extremamente irregular, além de algumas ocorrências de formação de cavidades. Em alguns casos foi constatada perda de água por estruturas de ângulo elevado, inviabilizando nestes casos a correta obturação. Estes não estão inclusos na contagem de 84 ensaios. O Anexo 02 apresenta os resultados completos.

Tabela 26 - Resultado dos ensaios de perda de água sob pressão.

Ensaio	Sondagem	Intervalo obturado (m)		Estruturas presentes	Condição hidráulica observada em baixa pressão de injeção	Permeabilidade do intervalo (cm/s)
E1	5718	30,00	31,00	Horizontal (G1)	Consumo de Água	8,06E-06
E2	5718	33,00	34,00	N-S alto (G7)	Consumo de Água	1,22E-05
E3	5718	38,00	39,00	NW (G4) e G1	Consumo de Água	5,77E-05
E4	5718	43,00	46,00	NW (G4)	Consumo de Água	5,03E-05
E5	5718	49,00	50,00	N-S (G5)	Consumo de Água	8,87E-06
E6	5716	46,00	47,00	NE (G3)	Consumo de Água	1,61E-05
E7	5716	48,50	49,50	NE (G3)	Consumo de Água	9,02E-06
E8	5716	50,50	51,50	N-S alto (G7)	Consumo de Água	2,89E-06
E9	5716	57,00	58,00	NE (G3), G1 e E-W	Consumo de Água	8,06E-06
E10	5691	12,50	13,50	NE (G3)	Consumo de Água	6,67E-06
E11	5691	14,00	17,00	NE alto ângulo (G2)	Impermeável	-
E12	5691	18,20	19,20	NE alto ângulo (G2)	Impermeável	-
E13	5691	21,50	22,50	NE (G3)	Impermeável	-
	5691	25,50	26,50	G1, NE alto (G2) e E-W alto (G6)	Não obturável	
E14	5691	26,00	28,00		Consumo de Água	5,90E-07
E15	5691	28,00	29,00		Impermeável	-
E16	5691	31,50	32,50	E-W alto (G6)	Consumo de Água	7,32E-06
E17	5691	37,50	38,50	NE (G3)	Consumo de Água	1,81E-06
E18	5678	11,00	12,00	NW (G4) e G1	Impermeável	-
E19	5678	12,00	15,00		Impermeável	-
E20	5677	10,00	13,00	E-W alto (G6)	Impermeável	-
E21	5677	20,00	22,00	NW (G2) e G1	Impermeável	-
E22	5675	20,00	22,00	NW (G2), G1 e E-W	Consumo de Água	1,13E-05
	5675	22,00	25,00		Não obturável	
E23	5675	29,50	30,50	NE (G3)	Consumo de Água	5,29E-05
	5675	34,00	36,00	NW (G4 e 4a) e G1	Não obturável	
E24	5674	18,00	19,00	NE (G2) com E-W	Impermeável	-
E25	5674	31,00	33,00	NE (G2) com E-W	Impermeável	-
E26	5638	27,50	29,50	G1, N-S (G5) e NW (G8)	Impermeável	-

E27	5638	30,50	31,50	NE (G8)	Impermeável	-
E28	5638	34,00	35,00	N-S alto (G7)	Impermeável	-
E29	5638	35,50	37,50	NE (G3), NW (G4a) e NE (G8)	Impermeável	-
E30	5638	36,00	38,00		Impermeável	-
E31	5638	38,00	39,00	NE (G2)	Impermeável	-
E32	5638	44,00	46,00	G1 e E-W	Impermeável	-
E33	5638	50,00	51,00	E-W	Impermeável	-
E34	5637	19,50	20,50	NE (G8)	Consumo de Água	3,88E-06
E35	5637	20,00	21,00		Consumo de Água	5,39E-06
E36	5637	22,00	23,00	NE (G3)	Consumo de Água	1,83E-06
E37	5637	23,00	24,00	N-S (G5)	Consumo de Água	1,43E-04
E38	5637	24,00	25,00		Consumo de Água	2,63E-05
E39	5637	26,50	27,50	G1 e NE (G8)	Impermeável	-
E40	5637	30,00	31,00	N-S médio grau	Impermeável	-
E41	5637	31,50	33,50	NE (G3) e NW (G4a)	Impermeável	-
E42	5637	34,00	35,00	NE (G2 e G3)	Impermeável	-
E43	5637	38,00	39,00	NE (G2)	Impermeável	-
E44	5637	39,50	40,50	NE (G3)	Impermeável	-
E45	5637	42,50	43,50		Impermeável	-
E46	5637	43,50	44,50		Impermeável	-
E47	5672	15,50	18,50	NE (G8) e NW (G4a)	Consumo de Água	1,34E-06
E48	5672	22,00	23,00	NW (4a)	Consumo de Água	1,47E-06
E49	5672	27,00	28,00	NW (G4, G4a) e NE (G8)	Impermeável	-
E50	5672	31,00	32,00	NE (G2)	Impermeável	-
E51	5672	32,00	33,00	NE (G2)	Consumo de Água	3,23E-06
E52	5672	33,00	34,00	G1, NE (G3) e G6	Consumo de Água	3,23E-06
E53	5672	35,00	37,00	Faturamento intenso	Consumo de Água	5,17E-06
	5672	40,00	41,00	NE (G2)	Não obturável	
E54	5631	17,00	20,00	NE (G2)	Impermeável	-
E55	5631	22,00	25,00	Horizontal (G1)	Impermeável	-
E56	5631	27,00	28,00	Não identificável	Impermeável	-
E57	5665	32,00	33,00	N-S (G5)	Impermeável	-
E58	5665	35,00	36,00	NE (G2) e E-W (G6)	Impermeável	-
E59	5665	36,50	37,50	NW (G4a)	Consumo de Água	9,77E-06
E60	5665	38,00	39,00	Faturamento intenso	Consumo de Água	8,19E-05
E61	5665	40,00	41,00	G1 e NW (G4a)	Consumo de Água	6,80E-06
E62	5624	20,00	21,00	E-W alto (G6)	Impermeável	-
E63	5624	25,00	26,00	NE (G3)	Impermeável	-
E64	5624	28,00	30,00	G1, NE (G3) e N-S (G5)	Consumo de Água	2,78E-07
E65	5624	32,50	33,50	NW (4a) e NE (G2)	Impermeável	-

E66	5662	16,50	17,50	NE (G2)	Impermeável	-
E67	5662	29,00	31,00	NE (G3) e N-S intermediária	Impermeável	-
E68	5662	32,00	34,00	NW(G4a), NE (G8) e E-W (G6)	Impermeável	-
E69	5662	42,00	43,00	E-W (G6)	Impermeável	-
E70	5621	29,00	31,00	Horizontal (G1)	Consumo de Água	1,88E-07
E71	5621	34,00	36,00	NE (G8)	Impermeável	-
E72	5621	37,00	39,00	NE (G3) e E-W (G6)	Impermeável	-
E73	5621	39,00	40,00	Não identificável	Impermeável	-
E74	5621	42,00	44,00	NE (G8) e E-W	Impermeável	-
E75	5621	47,00	48,00	NE (G2 e G8)	Impermeável	-
E76	5657	23,00	24,00	NE (G8) muito alterado	Não obturável	
E77	5657	23,50	24,50	G1 e NE (G3) muito alterado	Não obturável	
E78	5657	25,00	27,00	NE (G2, G3 e G8)	Não obturável	
E79	5657	29,00	30,00	Não identificável, muito alterado	Não obturável	
E80	5657	31,00	32,00	NE (G2 e G8), muito alterado	Não obturável	
E81	5657	32,50	34,50		Não obturável	
E82	5657	37,00	38,00	NE (G2 e G3)	Consumo de Água	5,25E-05
E83	5628	17,00	20,00	Não disponível	Impermeável	-
E84	5628	22,00	25,00	Não disponível	Impermeável	-
E85	5628	27,00	30,00	Não disponível	Impermeável	-
E86	5669	17,00	20,00	Não disponível	Impermeável	-
E87	5669	22,00	25,00	Não disponível	Impermeável	-
E88	5669	30,00	33,00	Não disponível	Impermeável	-
E89	5745	15,50	16,50	G1, muito fraturado	Não obturável	
E90	5745	16,50	17,50	NE (G3), muito fraturado	Não obturável	
E91	5745	17,00	18,00	G1, muito fraturado	Não obturável	
E92	5745	23,00	24,00	NE (G3)	Impermeável	-
E93	5745	37,00	38,00	NW (G4) e G1	Impermeável	-

A partir dos valores obtidos nos ensaios, foram elaborados estereogramas para cada faixa de consumo (Figuras 42 a 45).

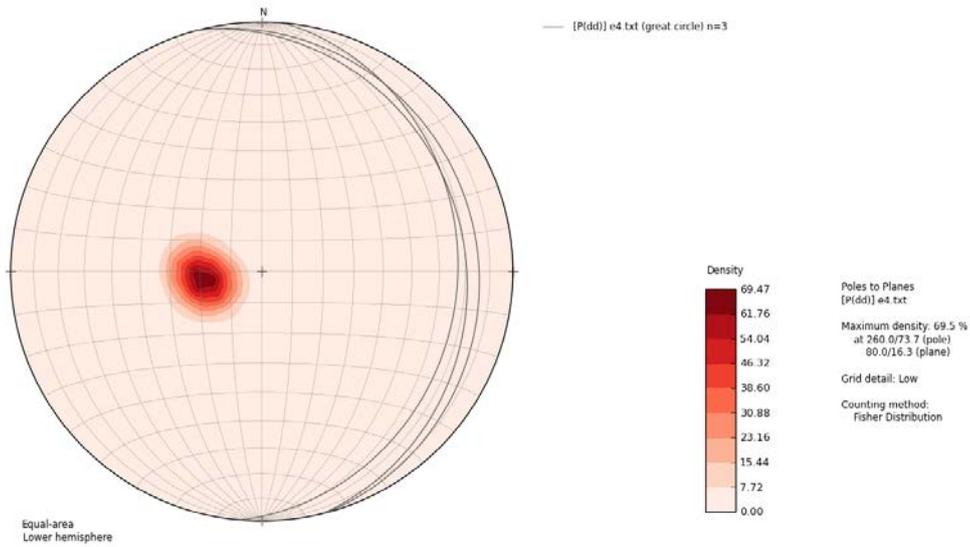


Figura 42 - Estereograma para o conjunto de estruturas com permeabilidade de 10^{-4} cm/s.

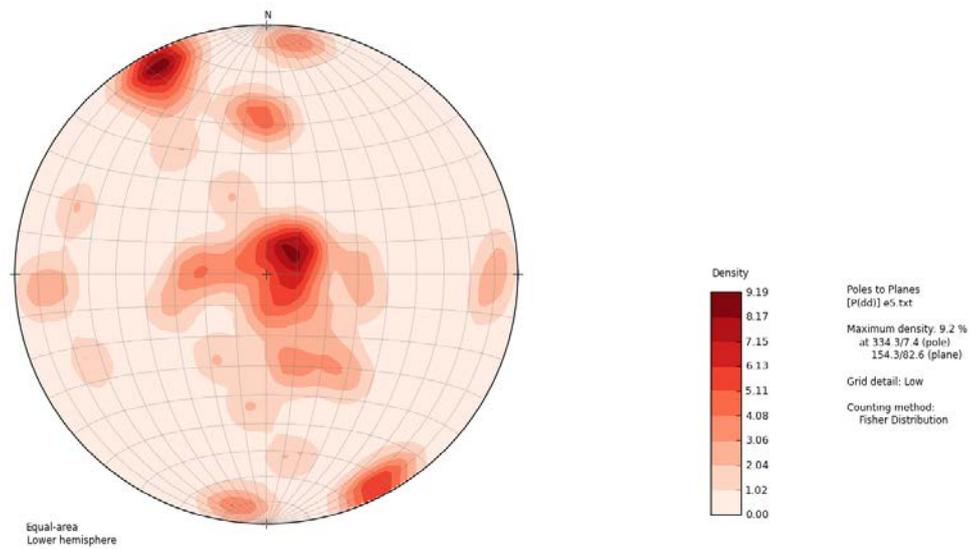


Figura 43 - Estereograma para os conjuntos de estruturas com permeabilidade de 10^{-5} cm/s.

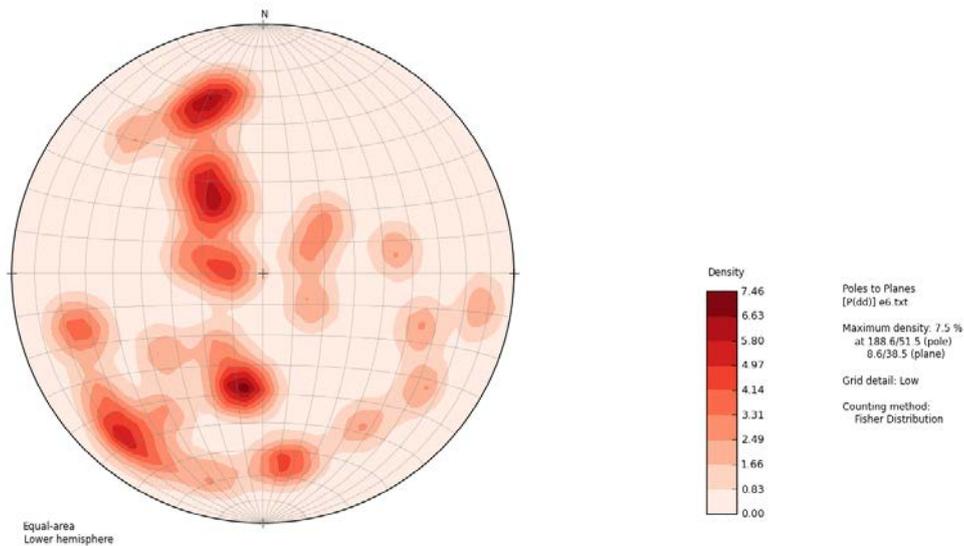


Figura 44 - Estereograma para os conjuntos de estruturas com permeabilidade de 10^6 cm/s.

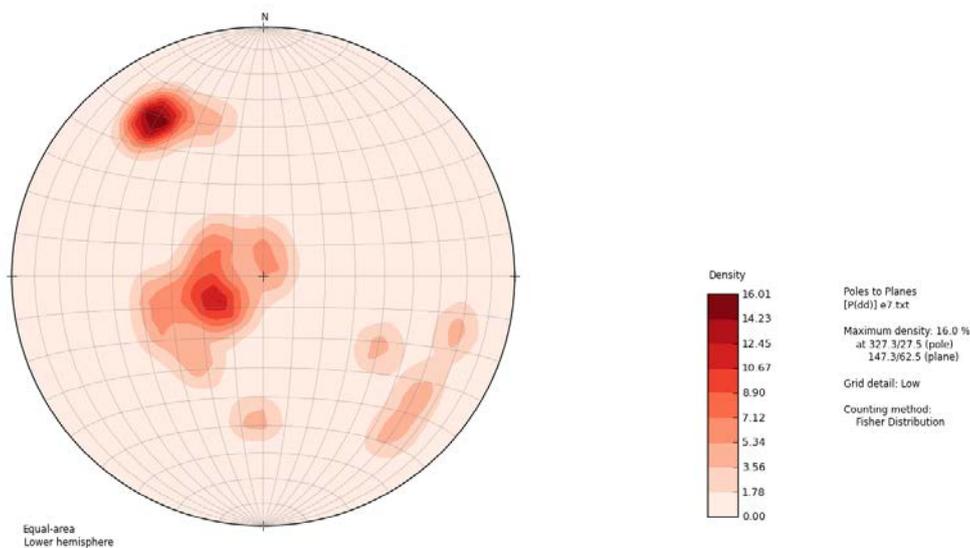


Figura 45 - Estereograma para os conjuntos de estruturas com permeabilidade de 10^7 cm/s.

A faixa de consumo com permeabilidade de 10^{-4} cm/s foi obtida em um conjunto de estruturas N-S de ângulo baixo a intermediário do Grupo 5. Para a faixa de consumo com permeabilidade de 10^{-5} cm/s são observados conjuntos de estruturas do Grupo 1 (horizontais a sub-horizontais), estruturas de alto ângulo do Grupo 2 (NE-SW), além de estruturas de alto ângulo N-S e E-W (Grupos 6 e 7). Para a faixa de consumo com

permeabilidade de 10^{-6} cm/s estão em maior ocorrência estruturas de ângulo médio a alto, em direção NW-SE dos Grupos 4 e 4a, além das estruturas NE-SW, em ângulo intermediário, do Grupo 3 (preferencialmente) e do Grupo 8. Na faixa de consumo com permeabilidade de 10^{-7} cm/s há a predominância de estruturas NE-SW dos Grupos 3 (preferencialmente) e 8, além das estruturas de baixo ângulo do Grupo 1.

A análise exclusiva dos estereogramas pode induzir a interpretações muito associadas à alta densidade de amostragem das estruturas de maior ocorrência (baixo ângulo – grupo 1, NE-SW de alto ângulo – grupo 2 e NE-SW de ângulo intermediário – grupo 3); isso ocorre pois 53,5% dos ensaios com consumo de água foram realizados em estruturas destes 3 grupos. Desta forma, os estereogramas de concentração de polos nas estruturas em que houve consumo refletem principalmente estes grupos. Para auxiliar uma correta interpretação, as ocorrências de ensaios com consumo de água e ensaios impermeáveis foram separadas em % frente ao total de ensaios realizados e o total de fraturas contabilizadas para cada grupo (Tabela 27 e Figura 46).

Com maiores porcentagens de ensaios com consumo frente ao total de ensaios realizados estão os grupos 5 e 7 (estruturas N-S) com 66,7 % (em que pese a falta de representatividade estatística do grupo 7). Estes grupos, apesar de pouco amostrados (em comparação com os grupos de maior densidade), possuem a maior parte de suas estruturas ensaiadas com resultados em que houve consumo de água. Considerando o total de fraturas contabilizadas, estes grupos mantêm os maiores percentuais, com respectivamente 10,5% e 50,0% (embora a baixa amostragem do Grupo 7 o classifique como não representativo).

Os grupos 3 (NE-SW de ângulo intermediário) e 1 (baixo ângulo) possuem mais resultados com consumo de água em números absolutos, isso é potencializado pela maior densidade de amostragem, entretanto, ao avaliar a porcentagem de ensaios com consumo frente aos ensaios com resultados impermeáveis à baixa pressão, é possível observar que estes aproveitamentos são de 47,5% e 50% respectivamente, com porcentagem de fraturas com consumo de água de 5,5% e 6,9%.

O grupo 2 (NE-SW de alto ângulo), associado à foliação regional, possui 4 resultados com consumo na casa de 10^{-5} cm/s, mas apenas 21% dos seus conjuntos de estruturas ensaiadas apresentou consumo de água; 15 dos seus conjuntos tiveram resultados impermeáveis à baixa pressão de injeção. Considerando os números totais de fraturas, o grupo mantém o baixo aproveitamento, com 2% das fraturas apresentando consumo de água.

Tabela 27 - Resumo dos ensaios de perda de água realizados.

Grupo de Fraturas		Ensaio com consumo de água	Ensaio impermeáveis	% de ensaios com consumo	Total de Fraturas	% de fraturas com consumo
baixo ângulo	Grupo 1	9	9	50	131	6,9
NE / alto ângulo	Grupo 2	4	15	21	178	2,2
NE / intermediária	Grupo 3	10	11	47,5	183	5,5
NW >65°	Grupo 4	2	4	33,3	99	2,0
NW/ intermediária	Grupo 4a	4	5	44	83	4,8
N-S / intermediária	Grupo 5	4	2	66,7	38	10,5
E-W / alto ângulo	Grupo 6	3	7	30	48	6,3
N-S / alto ângulo	Grupo 7*	2	1	66,7*	4	50,0*
NW / intermediária	Grupo 8	3	9	25	101	3,0

* Resultados do Grupo 7 não possuem representatividade estatística

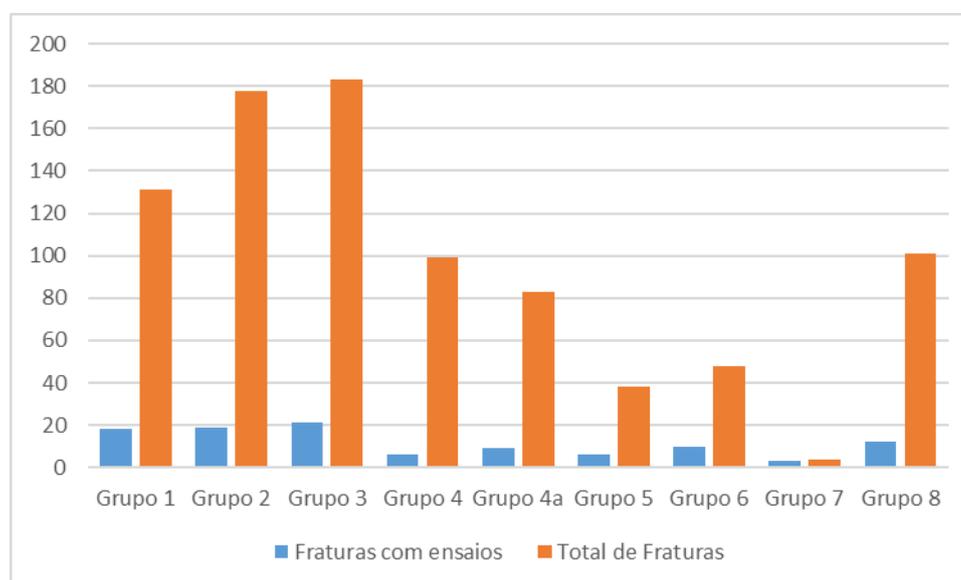


Figura 46 - Distribuição dos ensaios realizados para cada grupo de estruturas

7.3. ENSAIO DE BOMBEAMENTO EM POÇO EM ROCHA

Para o poço GRU-001, instalado na área da Estação Ponte Grande, foi feita a perfilagem óptica que indicou a presença de estruturas NW-SE relacionadas aos Grupos 4 e 4a com evidência de fluxo de água observada também nos testemunhos de sondagens (Figuras 47 a 50). Também foi constatada uma fratura N-S interceptando um veio quartzo-feldspático, entretanto sem evidência de fluxo observadas.

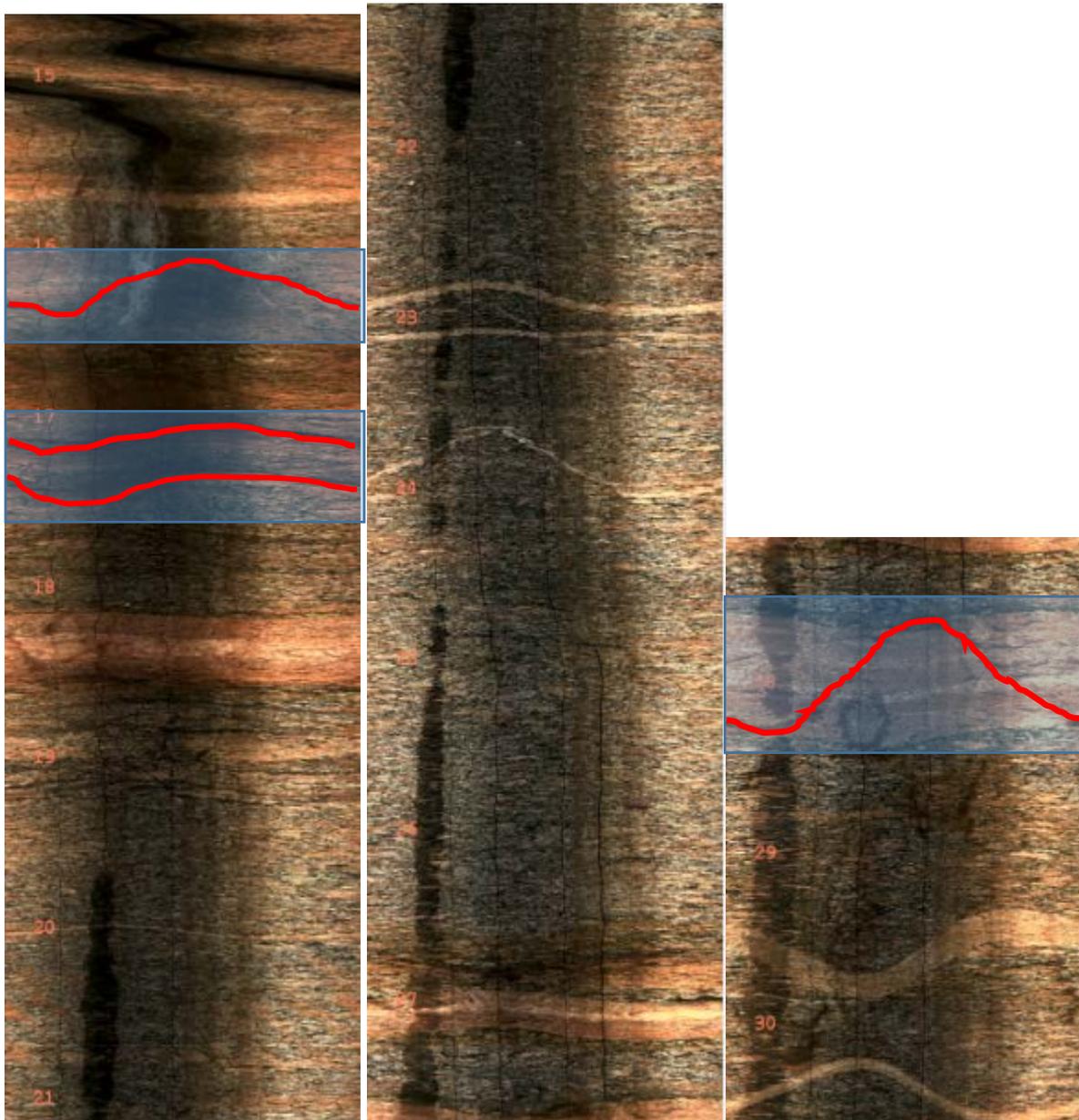


Figura 47 - Perfilagem óptica da sondagem do poço de bombeamento GRU-001 com a presença de estruturas com evidência de fluxo de água entre 16,0 e 18,0 m e estrutura em fratura de veio entre 27,5 m e 28,5 m.

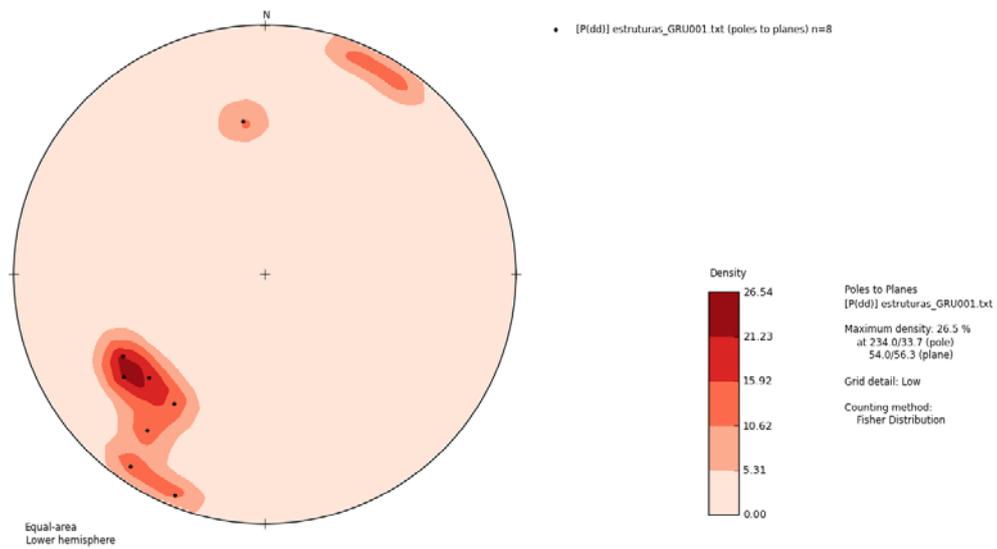


Figura 48 - Estereograma para as fraturas observadas no poço GRU-001



Figura 49 - Caixas de testemunhos da perfuração do furo guia do poço GRU-001



Figura 50 - Estruturas com evidência de fluxo de água no poço GRU-001.

Para avaliação da conectividade do aquífero fraturado com o aquífero de solo residual, foi realizado o bombeamento do poço GRU-001 em vazão variável, sendo observada a evolução dos níveis de água nos 17 piezômetros instalados no contato solo-rocha, conforme a Figura 51.



Figura 51 – Rede de monitoramento ao redor do poço GRU-001. Os poços em vermelho representam distância de até 5 m do poço de bombeamento; os poços em laranja representam distância de até 10 m e os poços em amarelo representam distância de até 20 m.

O bombeamento foi realizado por 72 horas, seguido de 24 horas de recuperação. A Tabela 28 apresenta os dados do bombeamento nas primeiras 12 horas. Em razão da baixa produção de água do poço, a bomba promovia o esgotamento do poço em menos de 1 min, ou seja, as fraturas que alimentam o poço são de baixa condutividade hidráulica; por esta razão o acionamento da bomba foi manual, procurando-se adotar 1 acionamento a cada hora. A Figura 52 apresenta a evolução dos dados de vazão do poço bombeado.

Tabela 28 - Dados do bombeamento nas primeiras 12 hs

Horário de acionamento da bomba	Tempo de funcionamento (segundos)	Vazão (l)	Tempo acumulado (horas)	Vazão média (l/h)
15/04/2015 10:03:00	180	420,0	-	0,000
15/04/2015 11:05:43	10	31,0	1,0	29,657
15/04/2015 12:02:23	14	28,5	2,0	30,176
15/04/2015 12:58:05	17	28,5	2,9	30,700
15/04/2015 13:52:35	18	28,5	3,8	31,376
15/04/2015 14:48:52	17	28,0	4,8	29,849
15/04/2015 15:45:12	10	13,5	5,7	14,379
15/04/2015 16:17:31	9	15,0	6,2	27,849
15/04/2015 16:50:44	12	26,0	6,8	46,964
15/04/2015 17:45:41	17	31,0	7,7	33,849
15/04/2015 18:39:58	20	29,5	8,6	32,607
15/04/2015 19:34:02	17	28,5	9,5	31,628
15/04/2015 20:29:18	15	30,0	10,4	32,569
15/04/2015 21:25:39	9	15,0	11,4	15,972
15/04/2015 21:58:14	7	16,5	11,9	30,384

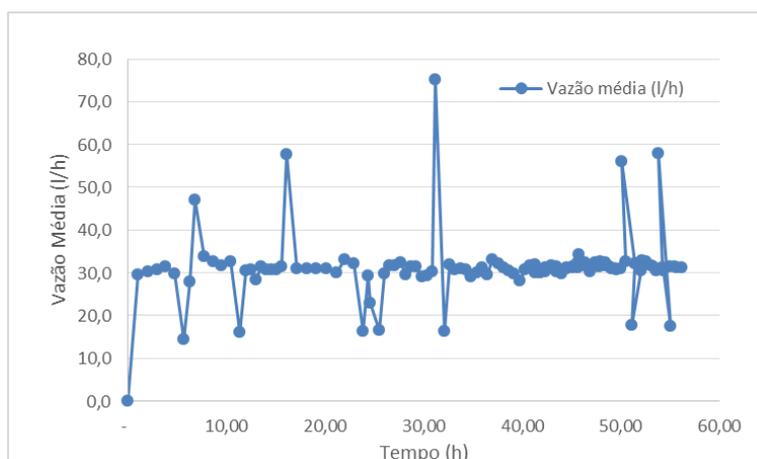


Figura 52 - Vazões médias obtidas no bombeamento do poço GRU-001.

A Figuras 53 a 55 apresentam a evolução nos níveis de água medidos nas três linhas de piezômetros de observação.

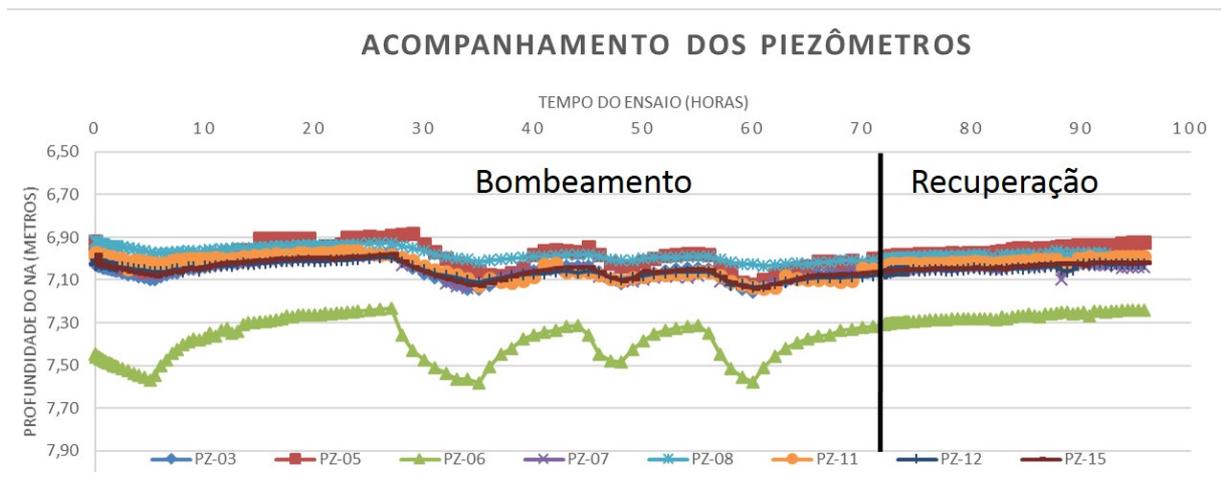


Figura 53 - Evolução do NA nos piezômetros posicionados até 5 m de distância

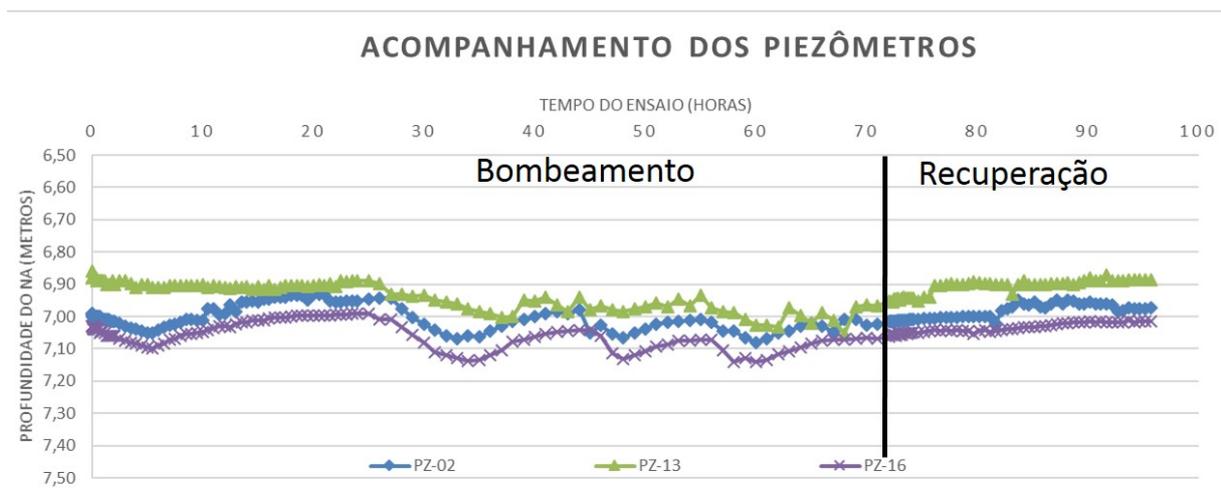


Figura 54 - Evolução do NA nos piezômetros posicionados a 10 m de distância.

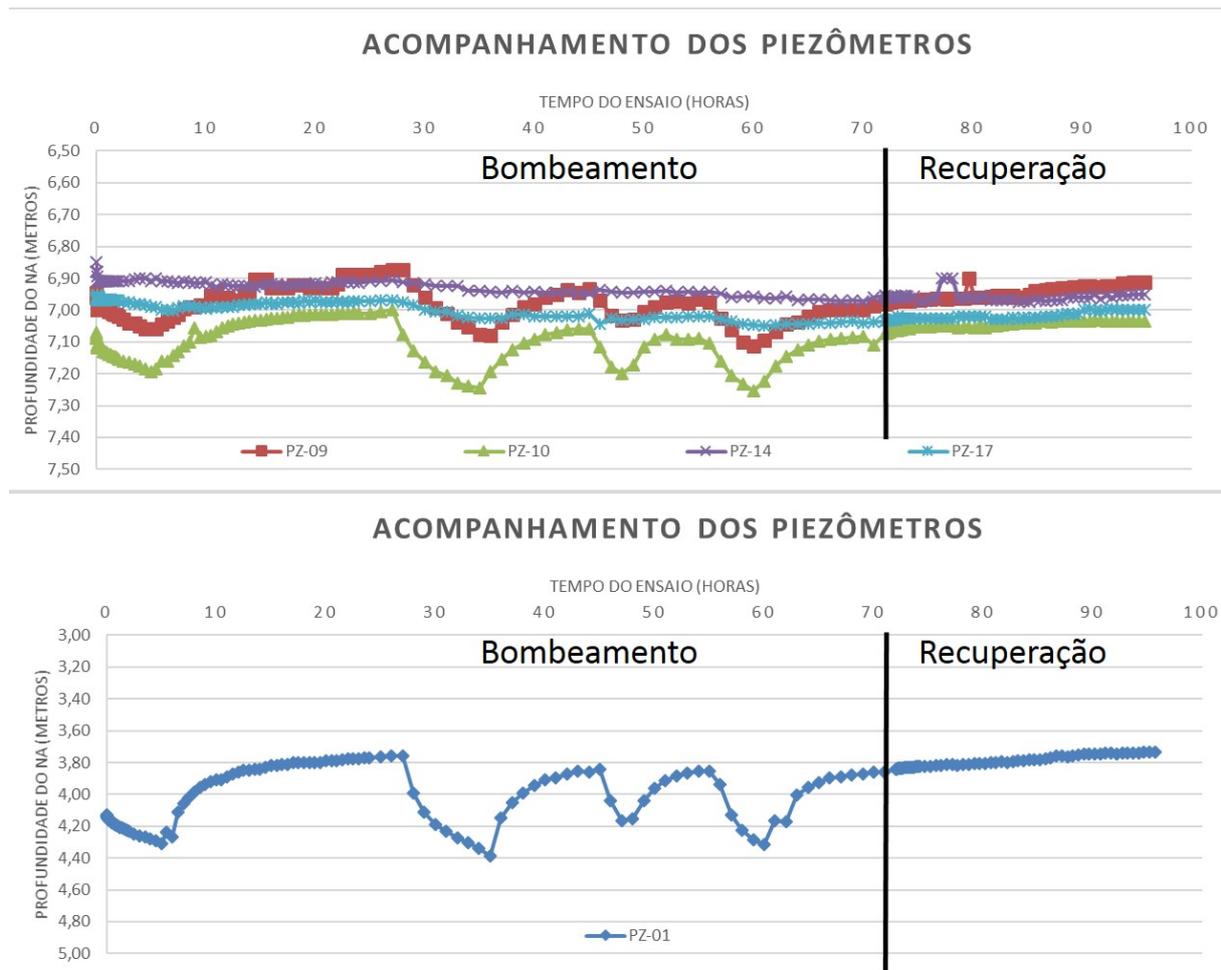


Figura 55 - Evolução do NA nos piezômetros posicionados entre 15 e 20 m de distância.

Como pode ser observado, o bombeamento do poço GRU-001 causou pouca influência no aquífero de solo residual. Foram constatados rebaixamentos de, no máximo, 70 cm nos piezômetros, sendo que a maior parte sofreu rebaixamentos de até 20 cm. Foi observado que os piezômetros PZ-01 (0,66 cm), PZ-04 (0,39 cm), PZ-06 (0,35 cm), PZ-10 (0,25 cm), PZ-09 (0,24 cm) e PZ-05 (0,24 cm) apresentaram os maiores rebaixamentos (acima de 20 cm), sugerindo uma conexão de fraturas na porção ENE.

Os dados de bombeamento mostram que as vazões do poço GRU-001 são extremamente baixas, com média em torno de 30 l/h. A baixa produção é compatível e associada às fraturas NW-SE interceptadas pelo poço e ao baixo grau de fraturamento no maciço.

Embora o rebaixamento seja muito discreto, é constatado que há efetivamente a comunicação entre aquífero fraturado e aquífero residual na área estudada, deixando o

indicativo de que a interceptação de estruturas mais condutivas, associadas a um maior grau de fraturamento, poderia promover rebaixamentos de maior intensidade.

Após o final do bombeamento, foi feito o acompanhamento da recuperação do NA no poço de bombeamento. O poço GRU-001 recuperou 15 m de coluna de água nas primeiras 10 horas de recuperação e mais 5,5 m nas 14 horas seguintes. Uma vez que ao final das 24 horas de recuperação o poço não apresentou total estabilização do NA, optou-se por fazer uma leitura adicional de 48 horas, onde foi constatada a recuperação efetiva do NA. A Figura 56 apresenta a evolução do NA do poço de bombeamento no ensaio de recuperação.

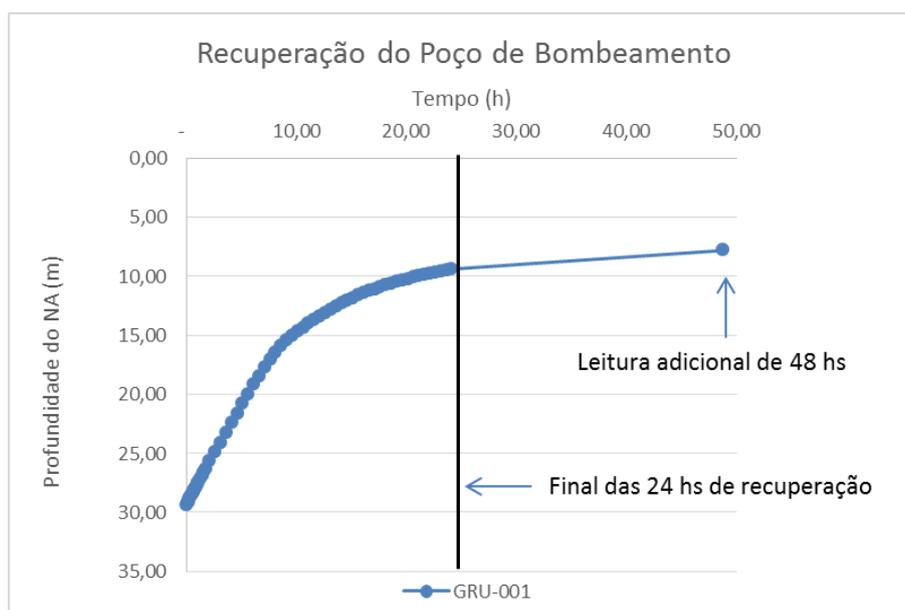


Figura 56 - Evolução do NA no poço de bombeamento durante a recuperação.

7.4 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NO SOLO RESIDUAL

A partir dos ensaios de infiltração nos piezômetros instalados nos diversos níveis de alteração dos solos residuais encontrados na área de estudo, foi realizado o cálculo da condutividade hidráulica (k), em cm/s, tanto para o método de Hvorslev, como para Bower & Rice. Os resultados, separados de acordo com o grau de alteração do solo, são apresentados nas Tabelas 29 a 32. Os gráficos de modelagem das retas de rebaixamento, necessárias para obtenção dos parâmetros, são apresentados no Anexo 03.

Tabela 29 - Valores de condutividade hidráulica para solos eluviais (porosidade intergranular)

Piezômetro	Hvorslev (cm/s)	Bouwer & Rice (cm/s)	Observação
5624A.	1,99E-05	1,52E-05	-
5663A.	5,06E-06	3,87E-06	-
5675A.	2,42E-05	1,85E-05	-

Tabela 30 - Valores de condutividade hidráulica para solos residuais maduros (porosidade intergranular)

Piezômetro	Hvorslev (cm/s)	Bouwer & Rice (cm/s)	Observação
5624B	2,34E-04	1,79E-04	-
5634A.	4,06E-04	3,11E-04	-
5639A.	4,18E-05	3,20E-05	-
5657A.	7,66E-05	5,86E-05	-
5662A.	5,93E-05	4,54E-05	-
5664A.	1,16E-04	8,90E-05	-
5665A.	1,74E-05	1,33E-05	-
5675B	2,62E-04	2,00E-04	-
5460	3,17E-04	2,43E-04	até 2 m do contato solo/rocha
5484	1,63E-04	1,25E-04	até 2 m do contato solo/rocha

Tabela 31 - Valores de condutividade hidráulica para solos residuais jovens (dupla porosidade – intergranular e fissural)

Piezômetro	Hvorslev (cm/s)	Bouwer & Rice (cm/s)	Observação
5624C	6,30E-04	4,82E-04	até 2 m do contato solo/rocha
5629	4,64E-05	3,55E-05	até 2 m do contato solo/rocha
5634B	1,76E-04	1,35E-04	até 2 m do contato solo/rocha
5639B	9,08E-05	6,95E-05	até 2 m do contato solo/rocha
5657B	1,39E-04	1,07E-04	até 2 m do contato solo/rocha
5662B	4,05E-04	3,10E-04	-
5663B	2,44E-04	1,87E-04	-
5663C	1,80E-04	1,38E-04	-
5665B	1,36E-05	1,04E-05	-
5672A.	1,02E-04	7,81E-05	-
5675C	2,50E-04	1,91E-04	até 2 m do contato solo/rocha
5691	7,10E-05	5,44E-05	até 2 m do contato solo/rocha

Tabela 32 - Valores de condutividade hidráulica para saprólitos (dupla porosidade – intergranular e fissural, com maior influência da última)

Piezômetro	Hvorslev (cm/s)	Bouwer & Rice (cm/s)	Observação
5662C	1,86E-05	1,43E-05	até 2 m do contato solo/rocha
5663D	6,77E-06	5,18E-06	até 2 m do contato solo/rocha
5664B	3,75E-04	2,87E-04	até 2 m do contato solo/rocha
5672B	5,56E-04	4,25E-04	-
5682B	8,77E-06	6,72E-06	até 2 m do contato solo/rocha
5717C	1,19E-05	9,08E-06	até 2 m do contato solo/rocha
45B	2,79E-06	2,13E-06	até 2 m do contato solo/rocha
5487	7,32E-05	5,60E-05	até 2 m do contato solo/rocha
5515	3,17E-05	2,43E-05	até 2 m do contato solo/rocha

Os resultados mostram que as porções de solos residuais maduros e jovens são as que possuem os maiores valores de condutividade hidráulica, apresentando-se nas faixas de 10^{-4} a 10^{-5} cm/s, com valores ligeiramente maiores para os solos residuais maduros.

Os saprólitos possuem maior dispersão de resultados e apresentaram valores nas faixas de 10^{-4} a 10^{-6} cm/s. Os valores médios para os saprólitos são menores do que os dos solos residuais maduros e jovens em função da menor influência da porosidade primária nestes materiais. Por estarem com menor grau de alteração, ainda há uma significativa dependência das estruturas relacionadas às descontinuidades da rocha mãe; como o maciço possui poucas fraturas, o saprólito (que possui dupla porosidade, mas com maior influência da porosidade fissural) apresenta condutividade hidráulica menor.

Para os solos eluviais há uma baixa amostragem; os poucos valores estão na faixa de 10^{-5} a 10^{-6} cm/s. Estes menores valores de condutividade podem ser explicados pela maior incidência de processos pedogenéticos a que estes solos estão submetidos, com maior formação de argilominerais que, pela sua estrutura e granulometria, tendem a apresentar menor condutividade hidráulica.

Com relação ao horizonte de contato do maciço de solos residuais (incluindo o horizonte saprolítico) com o maciço de rocha sã, de grande importância para estudos geotécnicos e ambientais, constatou-se no trecho estudado que nem toda porção deste

contato é formada por saprólitos. Este estudo constatou que especificamente neste maciço a formação de saprólito é bastante discreta e em algumas localidades o contato solo/rocha apresenta solos residuais jovens a maduros. Este contexto é muitas vezes observado em áreas onde há maior ação de corpos hídricos superficiais que intensificam a alteração da porção saprolítica em função da maior renovação química das águas que infiltram no maciço, acelerando o processo de alteração intempérica. Além disso, sugere-se uma contribuição do fluxo de água pelas das discontinuidades horizontais do Grupo 1, intensificando o processo de alteração das porções superiores do maciço rochoso e a região de contato saprólito/rocha.

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O traçado estudado tem ampla interação com um maciço de rocha granito gnáissica e seus produtos de alteração intempérica (solos residuais). A interação com o maciço rochoso ocorrerá na escavação dos túneis, enquanto que para a escavação de poços e estações haverá ampla interação com os solos residuais.

O topo rochoso é bastante irregular e condicionado por estruturas geológicas associadas a uma pronunciada zona de cisalhamento. A rocha predominante é um granito gnaiss pouco alterado e com excelentes propriedades geomecânicas. São constatado litotipos gnáissicos e até milonitizados próximo a áreas de falhamentos.

A análise estrutural a partir da perfilagem óptica identificou os seguintes grupos de fraturas:

- Fraturas de baixo ângulo, com direções diversas e mergulhos médios de até 10°, bastante associadas a encaixes de veios. Configuram-se também como estruturas de alívio próximo ao topo rochoso e podem condicionar o perfil de solo residual próximo ao contato com a rocha sã.
- Fraturas NE-SW de alto ângulo (> 65°), paralelas à foliação regional, com mergulho preferencialmente para SE; desenvolvem intensa alteração e desenvolvimento de películas de oxidação, mas não produzem abertura aparente significativa.
- Fraturas NE-SW, de ângulo médio, com mergulho SE e ampla ocorrência no maciço estudado; são paralelas à foliação de médio ângulo observada no granito gnaiss do maciço. Apresentam abertura aparente e desenvolvimento de capa de alteração no maciço adjacente.

- Fraturas NW-SE de alto ângulo; apresentam menos feições associadas ao fluxo de água subterrânea salvo pelo desenvolvimento de películas de oxidação e aberturas aparentes pouco significativas. É raro observar formação de capas de alteração; normalmente apresentam elevada rugosidade, com contornos irregulares e têm ocorrência bastante disseminada pelo maciço.
- Fraturas NW-SE, de mergulho médio para NE; desenvolvem preferencialmente apenas alteração localizada.
- Fraturas NE-SW de mergulho intermediário, com caimento para NW, observadas nas porções internas do maciço. Nestas estruturas foram pouco observadas feições associadas ao fluxo de água.
- Fraturas N-S com importância significativa nos levantamentos; as maiores ocorrências são com mergulhos de baixo e médio grau, mas foram observadas algumas ocorrências de alto ângulo com alteração nas paredes do maciço e oxidações em tons ocres a avermelhados.
- Estruturas E-W tiveram pouca ocorrência no maciço e também não apresentaram características importantes relacionadas ao fluxo de água, exceto por ocorrências localizadas de formação de capa de alteração no maciço adjacente.

Estruturas com feições indicativas de ocorrência de fluxo de água foram selecionadas para ensaios de perda de água sob pressão. Foram considerados nos ensaios apenas estágios do primeiro ciclo de baixa pressão. Os resultados mostram que estruturas de ângulo intermediário em direções N-S e NE-SW configuram-se como as de maior importância para a circulação de água no maciço. As estruturas de baixo ângulo também se mostraram importantes para este processo. As feições NE-SW, de alto ângulo apesar da grande ocorrência, apresentaram os menores valores de consumo entre todos os tipos analisados.

O ensaio de bombeamento realizado em poço instalado no maciço rochoso, interceptando estruturas NW de ângulo intermediário confirmou a existência de comunicação entre o aquífero fraturado e o aquífero de solo residual. Mesmo com vazão extremamente baixa, condicionada pelo baixo grau de fraturamento e pela pouca abertura das estruturas presentes, houve impacto de até 70 cm no aquífero residual. Esta constatação tem grande importância para estudos geotécnicos e ambientais.

A perfilagem óptica se mostrou eficiente no processo de análise de feições indicativas de fluxo de água subterrânea e nos levantamentos estruturais. A sua aplicação, combinada com a verificação dos testemunhos de sondagens, contribui significativamente

para uma boa caracterização geológica de maciços rochosos para estudos hidrogeológicos em obras subterrâneas.

Os ensaios realizados nos piezômetros instalados nos diferentes horizontes de solos residuais forneceram dados bastante valiosos para o meio técnico-acadêmico. Os horizontes de solo residual maduro e solo residual jovem possuem as maiores condutividades hidráulicas, com valores entre 10^{-4} e 10^{-5} cm/s. Os valores obtidos para o saprólito possuem maior dispersão, ocorrendo entre 10^{-4} e 10^{-6} cm/s, o que pode ser explicado pela ainda presente influência de porosidade secundária. Os solos eluviais foram pouco amostrados, mas apresentaram os menores valores, o que pode ser explicado pela incidência de processos pedogenéticos, com maior presença de argilominerais.

Com base nas informações obtidas com este estudo, são feitas algumas recomendações:

- Dar continuidade aos levantamentos estruturais, aprofundando o conhecimento dos grupos de fraturas observadas e ampliar o estudo para a avaliação dos mecanismos formadores destas;
- Realizar novas sondagens, preferencialmente inclinadas, para aumentar a amostragem das estruturas de alto ângulo. No âmbito do Projeto Executivo, momento em que as áreas já se encontram destinadas à obra, há maiores condições de realizar estas sondagens.
- Fazer uma simulação numérica do fluxo de água na rede de fraturas para complementar o entendimento das estruturas que condicionam o fluxo.
- Complementar a aplicação da perfilagem óptica, combinando com a perfilagem acústica para melhor avaliar a abertura das fraturas e com o flowmeter, para maiores informações sobre o fluxo de água subterrânea em maciços fraturados.

9. BIBLIOGRAFIA

- ABREU A.A. 1992. Do pátio do Colégio ao Planalto Paulistano: Problemas geomorfológicos emergentes do sítio metropolitano. In: ABAS/ABGE/SBG-SP, Problemas geológicos e geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo, p. 47-56.
- ALMEIDA F. F. M., HASUI Y., BRITO NEVES B. B., FUCK R. A. 1977. Províncias estruturais brasileiras. 1977. In: SBG/NE, Simp. Geol. NE, 8. Campina Grande, *Atas*, 363-391.
- ALVES, F. M. 2008. Tectônica Rúptil Aplicada ao estudo de aquífero em rochas cristalinas fraturadas na região de Cotia, SP. 189 fl. Dissertação (mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES – ABEF. 1989. Research on foundation engineering. In: XII ICSMF, p. 9 – 45.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL – ABGE. 2013a. Manual de Sondagens, Boletim n.3, 5. edição. São Paulo. 203p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL – ABGE. 2013b. Diretrizes para classificação de sondagens. 1ª edição. São Paulo. 118p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL – ABGE. 1975. Ensaio de perda d'água sob pressão – Diretrizes. Boletim nº 2, 17p.
- BAILLOT, R. T.; BARTON, N.; ABRAHÃO, R. & RIBEIRO JR. 2004. *Comparing 360° televising of drill hole walls with core logging*. ISC 04. 8p.
- BERTACHINI, A. C. 1987. Estudo das características hidrogeológicas dos terrenos cristalinos sob clima úmido, na região de Jundiá. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 180 p.
- BRIZ-KISHORE, B. H. 1993. *Assessment of yield characteristics of granitic aquifers in South India. GroundWater, Connecticut Landfill, Storrs, Connecticut, 2000 to 2001, United States Geological Survey*, 31(6):921-928.
- CARNEIRO C. D. R.; HASUI Y. & DANTAS A. S. L. 1984. Contribuição ao estudo da litoestratigrafia do Grupo São Roque na faixa Jaraguá-Cristais-SP. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 33, Anais. Rio de Janeiro, p.3212-3226.
- CAMPOS NETO M. C. Orogenic systems from southwestern Gondwana: an approach to Brasileiro – Pan African cycle and orogenic collage in southeastern Brazil. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAS FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (Eds.) *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro: s.n. 2000. p. 335-365.

- CAVALCANTE, I. N. 1990. Estudo hidrogeológico de terreno cristalino com manto de intemperismo: área piloto de Atibaia (SP). Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 123 p.
- CECÍLIO JÚNIOR, M. O. 2009. Estudo do comportamento de um túnel em solo residual de gnaiss por meio de ensaios triaxiais com controle de trajetória de tensões. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 204 p.
- CHILTON, P. J. & FOSTER, S. S. D. 1995. *Hydrogeological characterisation and water-supply potential of basement aquifers in tropical Africa. Hydrogeology Journal*, 3(1):36-49.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. (2006) “Mapa Geológico do Estado de São Paulo: Escala 1:750000. Breve descrição das unidades litoestratigráficas aflorantes no Estado de São Paulo”, 173 p.
- COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO – CMSP. 2014. Projeto Básico: Relatório Geológico-Geotécnico – Linha 4 – Fase 3. Relatório Técnico RT-4.22.00.00/4C3-001. Relatório elaborado pela Empresa Brasileira de Engenharia e Infra-estrutura - EBEI, São Paulo, 223p.
- COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO – CMSP. 2013a. Sondagens e ensaios geotécnicos. Especificação Técnica: ET-9.00.00.00/3W9-001. Documento Interno da CMSP, São Paulo, 16p.
- COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO – CMSP. 2013b. Televisamento de Furos de Sondagens: Especificação Técnica. ET-9.00.00.00/3W8-001. Documento Interno da CMSP, São Paulo, 13p.
- COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO – CMSP. 1997. Ensaio para determinação das permeabilidades tridimensionais do maciço rochoso. Relatório Técnico RT-4.00.00.00/4C3-111. Relatório elaborado pelo IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 547p.
- COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO – CMSP. 1981. Especificação de serviços para instalação de piezômetros e indicadores de nível d’água (tipo tubo aberto): ES-9.00.00.00/3C3-002. Documento Interno da CMSP, São Paulo, 6p.
- CORDANI, U. G., COUTINHO, J. M. V., NUTMAN, A. 2002. Geochronological constraints on the evolution of the Embu Complex. São Paulo. *Journal of South American Earth Sciences*, 14:903-910.

- CORREA FILHO, D. 1985. Ensaio de perda d'água sob pressão. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- COSGROVE, J. 1998. *The role of structural geology in reservoir characterization*. In: M.P. Coward, T.S. Daltaban, H. Johnson (ed.) *Structural geology in reservoir characterization*, Geological Society, London, Special Publication, 127:1-13.
- COUTINHO J. M. V. 1980. Relações litológicas e estruturais da Bacia de São Paulo com o Pré-Cambriano circunvizinho. In: ABGE/SBG-SP. Aspectos geológicos e geotécnicos da bacia sedimentar de São Paulo. São Paulo, p. 15-23.
- COZZOLINO V. 1996. "Areias basais" fofas na área central da cidade de São Paulo. In: Revista Solos e Rochas, 19(2). São Paulo, p.163-174.
- DEERE, D. U. & PATTON, F. D. 1971. *Slope stability in residual soils*. In: 4ª Conferência Panamericana de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Porto Rico, 1:87-170.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. 2007. Manual de operação e manutenção de poços. 3º ed., São Paulo, 95p.
- DOMENICO P. & SCHWARTZ, F. 1990. *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley & Sons. New York, 824 p.
- EMPRESA METROPOLITANA DE PLANEJAMENTO DA GRANDE SÃO PAULO S.A. – EMLPLASA. 1986. Carta Geológica da Região Metropolitana de São Paulo. Folha 34 – SF.23-Y-C-III-4.
- EEG GEOFÍSICA. 2013. Estudos geofísicos. Relatório interno da CMSP.
- FERNANDES, A. J. 2008. Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. *Revista do Instituto Geológico*, São Paulo, 29 (1-2):49-72.
- FERNANDES, A. J., 1997. Tectônica Cenozóica na porção média da bacia do Rio Piracicaba e sua aplicação à hidrogeologia. Tese de Doutorado – Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.
- 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 de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 120p.

- FERNANDES, A. J.; PERROTA, M. M.; SALVADOR, E. D.; GIMENEZ FILHO, A.; STEFANI, F. L. & PAULON, N. 2005. Aquíferos Fraturados. In: Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo, 2005, p. 66-84
- FERNANDES, A. J. & ROULEAU, A. 2008. Simulação de deslocamentos em fraturas em basaltos da formação serra geral (Ribeirão Preto, SP) e implicações para a sua transmissividade. In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas da ABAS, São Luís. 19pp em CD ROM.
- FERNANDES, A. J. & MELLO, C. L. 2005. Coberturas cenozoicas e estruturas deformadoras na Depressão Periférica Paulista, Campinas, São Paulo. Revista do Instituto Geológico, v. 25, p. 49-66.
- FERNANDES, A. J. & RUDOLPH, D. 2001. *The influence of Cenozoic Tectonics on the groundwater-production capacity of fractured zones: a case study in Sao Paulo, Brazil. HydrogeologyJournal*, 9:151-167.
- FERRARI, A. L. 2001. Evolução tectônica do Gráben da Guanabara. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 412p.
- FIUME, B. 2013. Geologia estrutural de detalhe para elaboração de modelo conceitual de circulação de água subterrânea: estudo de caso em Jurubatuba, SP. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 165 p.
- FRANCH, F. A. J. 2008. Influência do tipo de revestimento superficial no fluxo não saturado e sua influência na estabilidade de taludes. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. 1979. *Groundwater*. Prentice Hall, New Jersey, 604 p.
- FUTAI, M. M.; CECÍLIO JÚNIOR, M. O. & ABRAMENTO, M. 2012. Resistência ao cisalhamento e deformabilidade de solos residuais da Região Metropolitana de São Paulo. In: ABMS, Solos das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Curitiba, 2012, p. 155-187.
- GALE, J. & ROULEAU, A. 1983. *Characterizing and interpreting the geometry, permeability and porosity of fractures for repository evaluation. In: International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Zurich, Proceedings*, p. 1343-1369. Geological Survey Fact Sheet 2007-3048, 4p.
- GROSS, M. R. 1993. The effects of mechanical stratigraphy on failure mode and fracture spacing in the Monterey Formation of coastal California [PhD thesis]: University Park, Pennsylvania, Pennsylvania State University, 183 p.

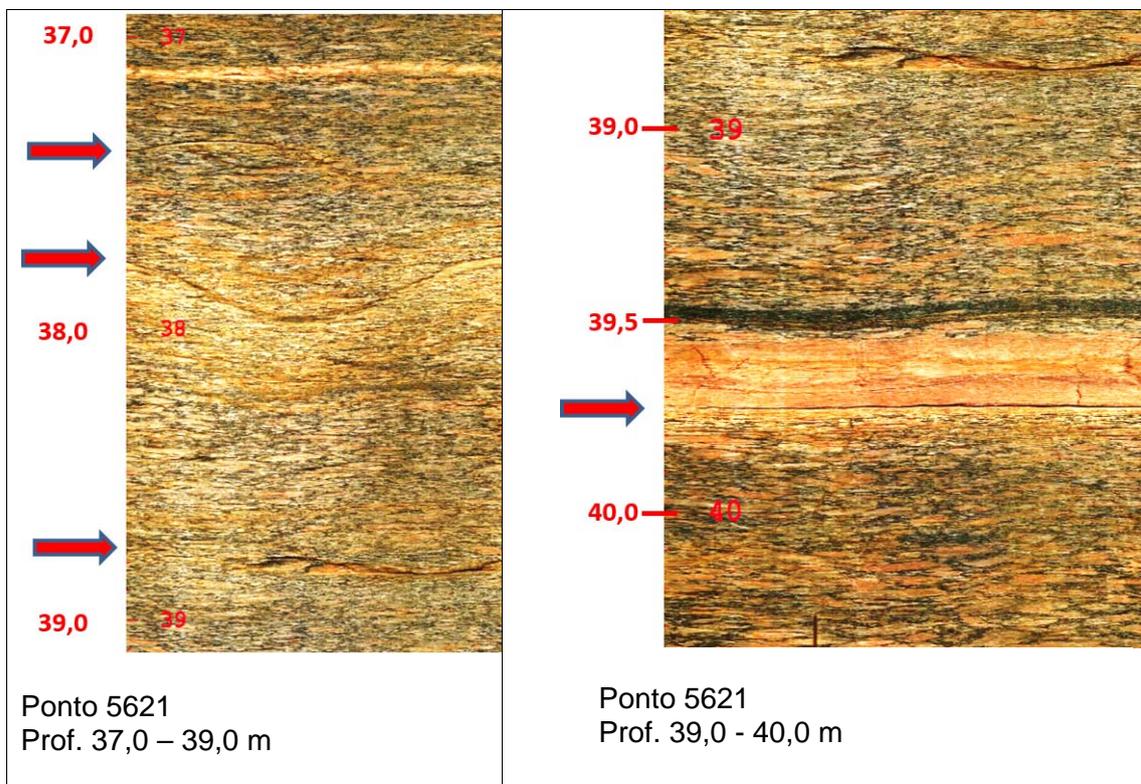
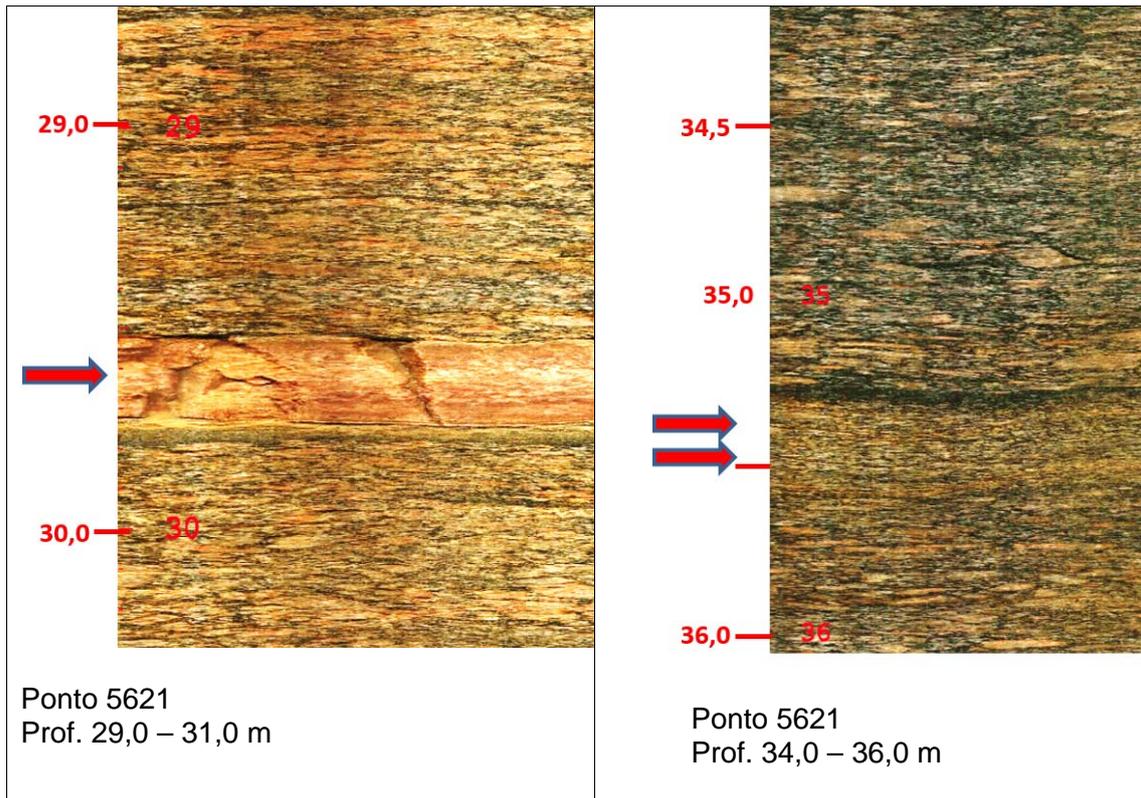
- GUIDICINI, G.; OLIVEIRA, A. M. S., CAMARGO, F. P. & KANJI, N. 1972. Um método de classificação geotécnica preliminar de maciços rochosos. In: Semana Paulista de Geologia Aplicada, 4, Anais. São Paulo, APGA.
- GURGUEIRA, M.D. 2013 Correlação de dados geológicos e geotécnicos na bacia de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 76 p.
- HASUI, Y. 2010. A grande colisão pré-cambriana do sudeste brasileiro e a estruturação regional. In: Geociências, v. 29, n. 2, p. 141 – 169.
- HASUI Y. 1994. Geologia estrutural das rochas da Linha 4: Avaliação e síntese dos conhecimentos. Relatório interno da Companhia do Metropolitano de São Paulo (CMSP). São Paulo, 27p.
- HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R. & BISTRICH, C.A. 1978. Os granitos e granitóides da Região de Dobramentos Sudeste no Estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Anais. Recife, 2594-2608.
- HASUI Y.; CARNEIRO C. D. R. & COIMBRA A. M. 1975. *The Ribeira Folded Belt*. In: Revista Brasileira de Geociências, 5(4). São Paulo, p.257-266.
- HEILBRON M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; CAMPOS NETO, M. C.; SILVA L. C.; TROUW R. A. J. & JANASI V. A. 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. São Paulo, p. 203-234.
- HVORSLEV, M. J. 1951. *Time lag and soil permeability in ground water observations*. U.S. Army Corps of Engineers Waterway Experimentation Station, Bulletin 36.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. 1997a. Ensaio para determinação das permeabilidades tridimensionais do maciço rochoso. Relatório Técnico RT-4.00.00.00/4C3-111. Relatório do acervo técnico da CMSP. São Paulo, 547 p.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. 1997b. Caracterização geomecânica do maciço rochoso do Trecho Faria Lima – Vila Sônia, Linha 4 – Amarela do Metrô de SP. Relatório Técnico Nº 34902.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. 1981. Mapa geológico do Estado de São Paulo, Escala 1:500.000. PRÓ MINÉRIO/PROMOCET, vol. 1. São Paulo, 126p.

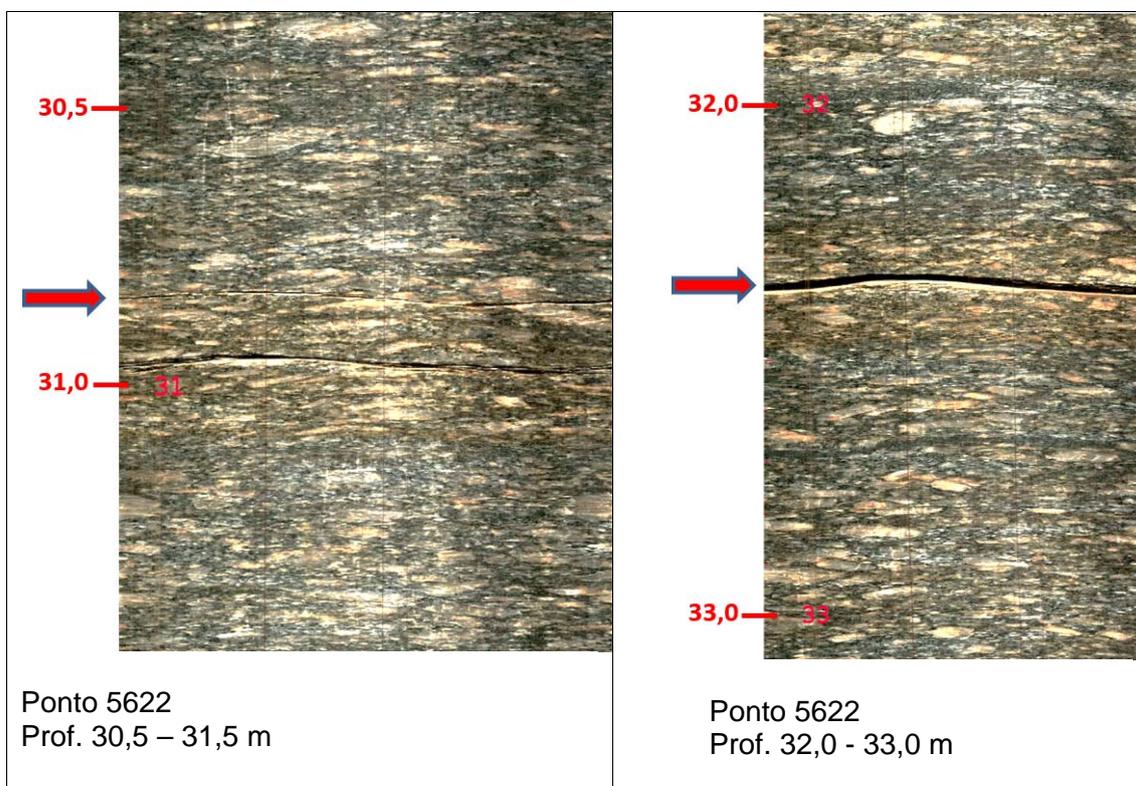
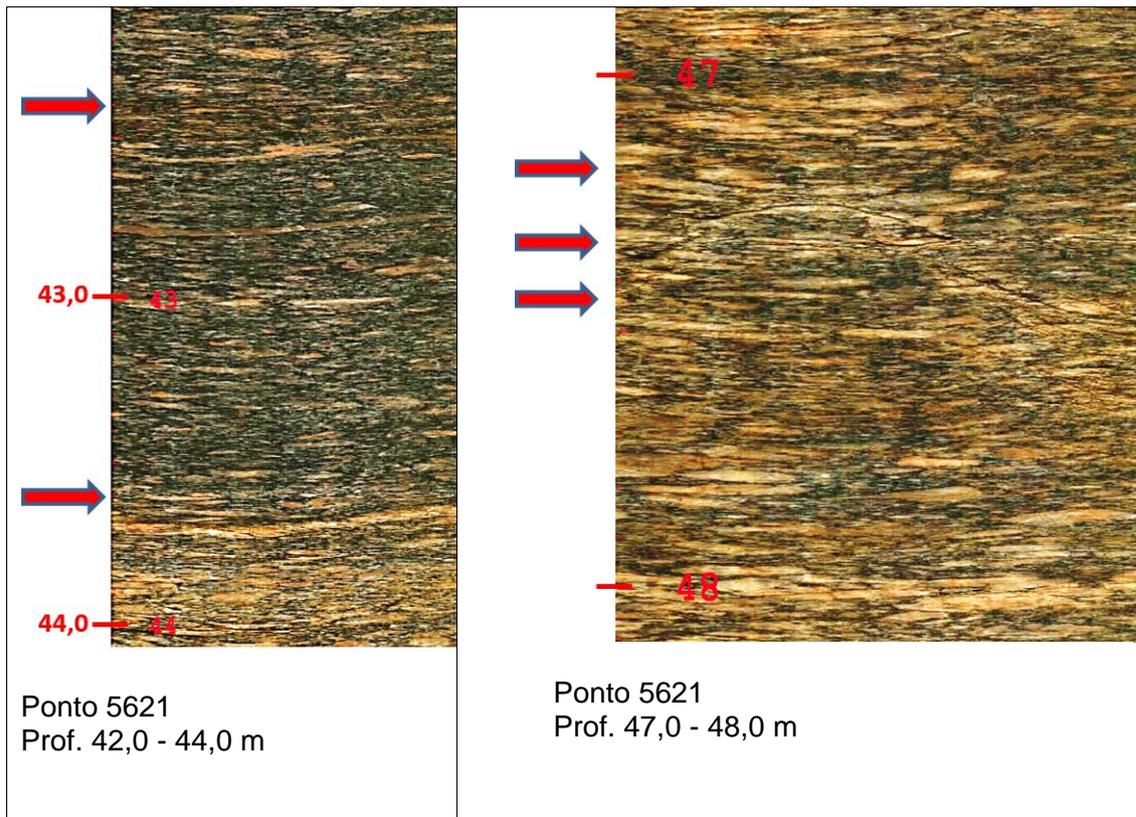
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS – ISRM. 1981. Rock characterization, testing & monitoring. Pergamon Press. 211 p.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS – ISRM. 1978. *Suggested methods for the quantitative description of rock masses*. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*, 15(6), p. 319-368.
- JANASI, V. A. & ULBRICH, H. H. G. J. 1991 *Late proterozoic granitoid magmatism in the state of São Paulo, southeastern of Brazil*. In: *Precambrian Research*, 51, p.351-374.
- JULIANI C. 1992. O embasamento pré-cambriano da bacia de São Paulo. In: ABAS/ABGE/SBG-SP, Problemas geológicos e geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo, p. 3-20.
- KUTNER A.S. & BJORNBERG A. J. S. 1997. Contribuição para o conhecimento geológico-geotécnico da bacia de São Paulo: litotipos, notação estratigráfica e feições estruturais relevantes. Revista Engenharia, edição 522. São Paulo, p. 65-73.
- LUGEON, M. 1933. *Barrage et géologie*. Ed. Dunod. Paris.
- MENEGASSE, L. N. 1991. Estudo hidrogeológico das rochas metassedimentares do Grupo São Roque a NW da Grande São Paulo: critérios para locação de poços profundos. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 104 p.
- MILLER, R. D. & STEEPLES, D. W. 1991. *Seismic-reflection processing demonstration using Eavesdropper*. Open File Report 91 (27). Kansas Geological Survey. 85p.
- MONTEIRO M. D.; GURGUEIRA M. D. & ROCHA H. C. 2012. Geologia da Região Metropolitana de São Paulo. In: ABMS, Solos das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Curitiba, 2012, p. 15-44.
- MORIN, R. H. & SAVAGE, W. Z. 2003. *Effects of crustal stresses on fluid transport in fractured rock: case studies from northeastern and southwestern USA*. *Hydrogeology Journal*, 11:100-112.
- ODLING, N. E. 1997. *Scaling and connectivity of joint systems in sandstones from western Norway* *Journal of Structural Geology*, 19 (10):1257-1271.
- ODLING, N. E.; GILLESPIE, P.; BOURGINE, B.; CASTAING, C.; CHILES, J.P.; CHRISTENSEN, N.P.; FILLION, E.; GENTER, A.; OLSEN, C.; THRANE, L.; TRICE, R.; AARSETH, E.; WALSH, J.J.; WATTERSON, J. 1999. Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractured hydrocarbon reservoirs.

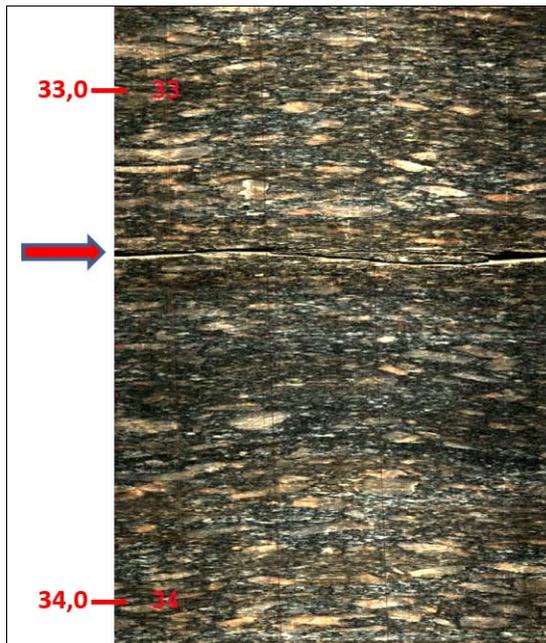
- Petroleum geoscience, v. 5, p. 373-384.
- OLIVEIRA, D. G. G. 2015. Televisionamento óptico de sondagens – Proposta metodológica para execução e suas aplicações em obras subterrâneas. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 187 p.
- OLIVEIRA, D. G. G.; FRANÇA, D. D.; MONTEIRO, M. D.; CICOTTI, F. M. LEMOS FILHO, M. X. & ROCHA, H. C. 2013. Evolução da proposta metodológica para execução e análise de Televisamento de sondagens: a especificação técnica do Metrô de São Paulo. XIV Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Rio de Janeiro, 10p.
- PINO, D. S. 2012. *Structural hydrogeology in the Kenogamy Uplands*, Quebec, Canada. Dissertação de Mestrado. L' Université du Quebec à Chicoutimi, Quebec, 184 p.
- PRICE, N. J.; COSGROVE, J. W. 1990. *Analysis of geological structures*. Cambridge University Press, Cambridge, 502 p.
- RIBEIRO, L. A. F. S. 2012. Perfilagens geofísica de poços tubulares profundos. Região do canal Jurubatuba, São Paulo (SP). Trabalho de conclusão de curso.
- RICCOMINI, C. 1995. Tectonismo gerador e deformador dos depósitos sedimentares pós-gondvanicos da porção centro-oriental do Estado de São Paulo e áreas vizinhas. Tese de Livre Docência. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 100p.
- RICCOMINI, C. 1989. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 256p.
- RICCOMINI, C; SANT'ANNA, L. C. & FERRARI, A. L. 2004. Evolução Continental do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: Neto, V.M.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Neves, B.B.B. (orgs). Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Beca, São Paulo, p. 385-405.
- RICCOMINI, C. & COIMBRA, A. M. 1992. Geologia da Bacia Sedimentar. In Ferreira, A. A.; Alonso, U. R.; Luz, P. L (Ed). Solos da cidade de São Paulo. São Paulo, ABMS/ABEF, p.37-94.
- RODRIGUEZ S. K. 1998. Geologia urbana da Região Metropolitana de São Paulo. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 171p.
- ROCHA, H. C. 2004. Perfis de alteração de rocha e classificação geomecânica. Relatório interno da Companhia do Metropolitano de São Paulo (CMSP). São Paulo, 12p.
- ROCHA, H. C. 1995. Algumas características dos solos arenosos terciários de São Paulo e suas implicações em obras subterrâneas. Dissertação de Mestrado. Escola de

- Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 136p.
- ROULEAU, A.; COUSINEAU, P.; DENIS, C.; LAPCEVIC, P. 1996. *The estimation of hydraulic parameters of a fractured orthoquartzite formation at laboratory and field scales*. In: M. Aubertin, F. Hassani, H. Mitri (ed), *Rock Mechanics Tools and Techniques, North American Rock Mechanics. Symposium.*, 2, Montreal, AA Balkema, p.1359- 1366.
- SALVADOR, E. D. & RICCOMINI, C. 1995. Neotectônica da região do alto estrutural de Queluz (SP-RJ, Brasil). *Revista Brasileira de Geociências*, n. 25 (3):151-164.
- SNOW, D.T. 1968. *Rock fracture spacings, openings and porosities*. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, 94, 73-91.
- TAKIYA, H. 1991. Aplicação dos métodos quantitativos espaciais a dados geológicos da Bacia de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 109p.
- TERZAGHI, R. D. *Sources of errors in joint surveys*. In: *Geotechnique*, 15(3), 287-304.
- THEIS, C. V. 1935. *The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage*, *Eos Trans. AGU*, vol. 16, p. 519–524.
- TOGNON, A. A.; CUNHA, M. A.; MONTICELI, J. J.; COPEDÊ JUNIOR, A. & MARANESI, D.A. 1981. Estudos geológico-geotécnicos para a definição da melhor alternativa do 2º conduto forçado da UH de Eloy Chaves, Rio Mogi-Guaçu, SP. In: 3º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Anais. Itapema.
- VAN SCHMUS W. R.; TASSINARI C. C. G. & CORDANI U. G. 1986. Estudo geocronológico da parte inferior do Grupo São Roque. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 34, Anais. Goiânia, 1399-1406.
- VIEIRA S. R. S. S. 1989. Estudo lito-estrutural da região de Embu-Guaçu-Parelheiros, São Paulo. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 122p.
- VLACH, S. R. F. 2001. *Microprobe monazite constraints for an early (ca. 790 Ma) Brasiliano Orogeny: The Embu Terrane, Southeastern Brazil* In: *III South American Symposium of Isotope Geology. Extended Abstract Volume (CD)*. p. 265.
- WILLIAMS J. H. & JOHNSON C. D. 2004. *Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies: Journal of Applied Geophysics*, 55(1-2):151-159.

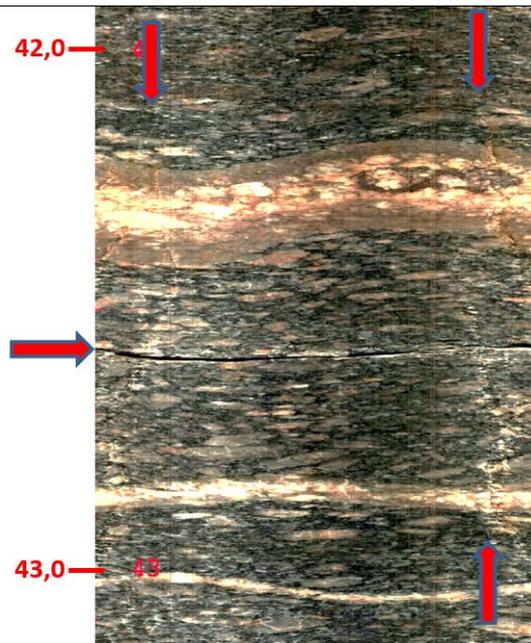
ANEXO 01 – ESTRUTURAS OBSERVADAS NA PERFILAGEM



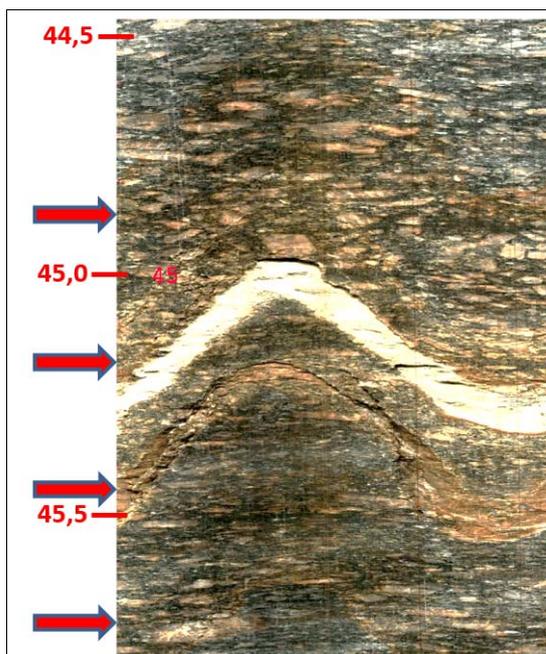




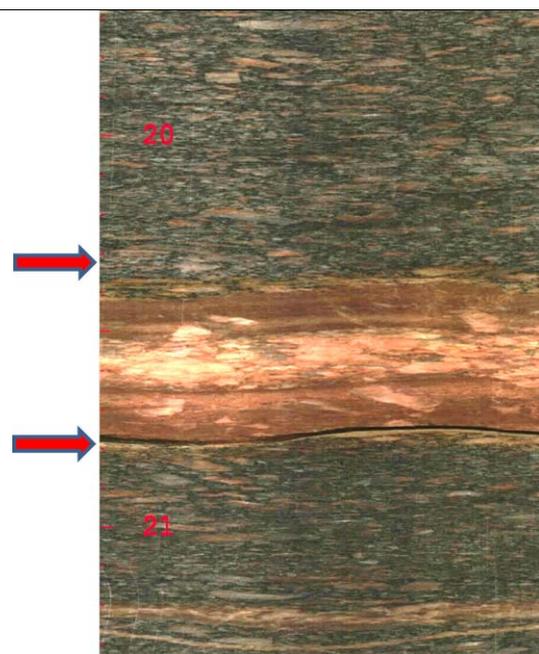
Ponto 5622
Prof. 33,0 - 34,0 m



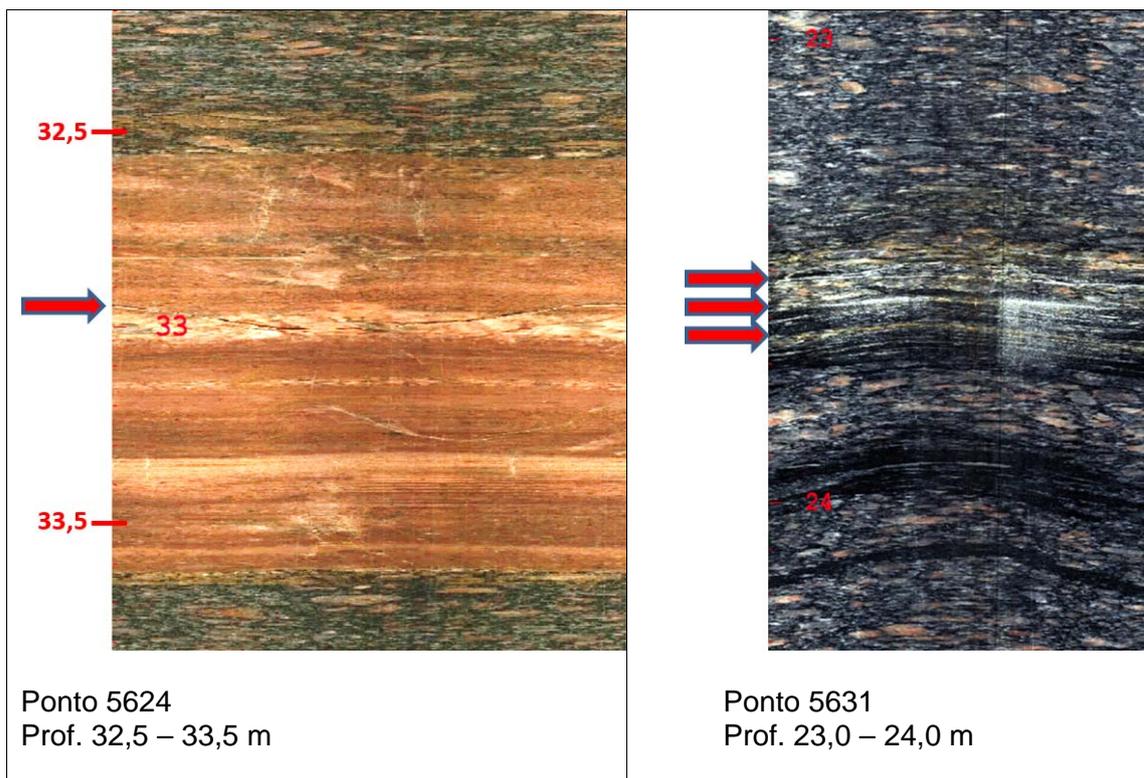
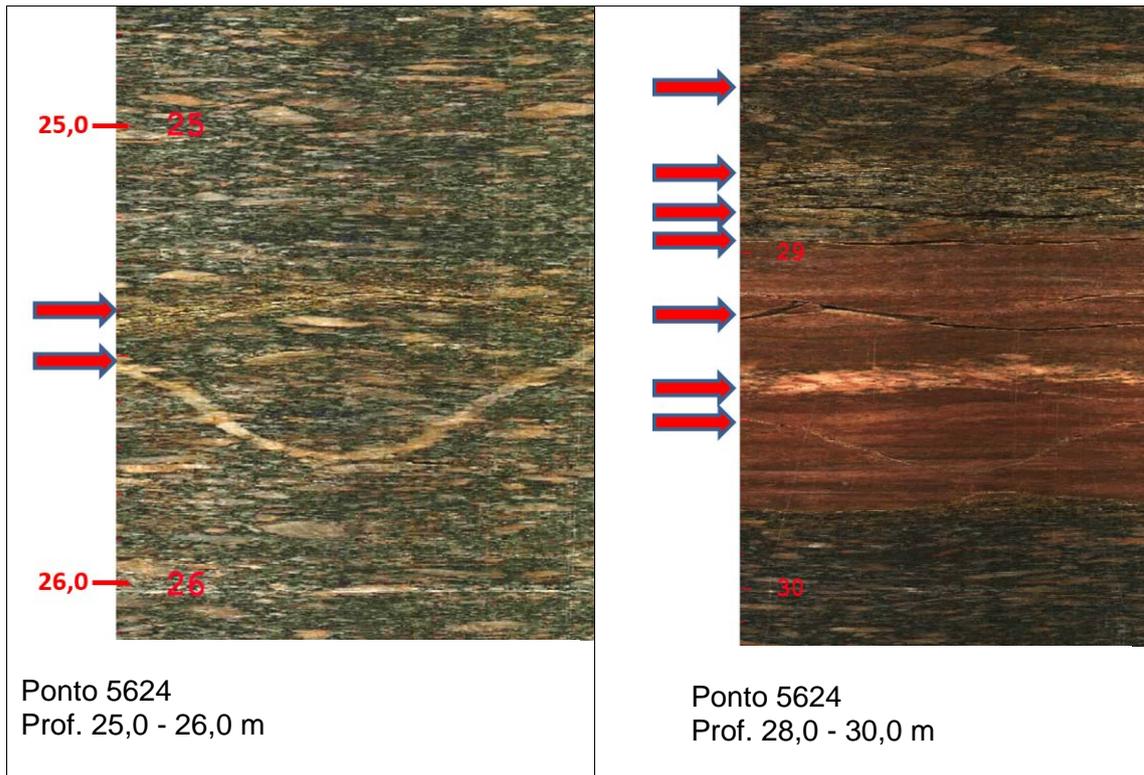
Ponto 5622
Prof. 42,0 - 43,0 m

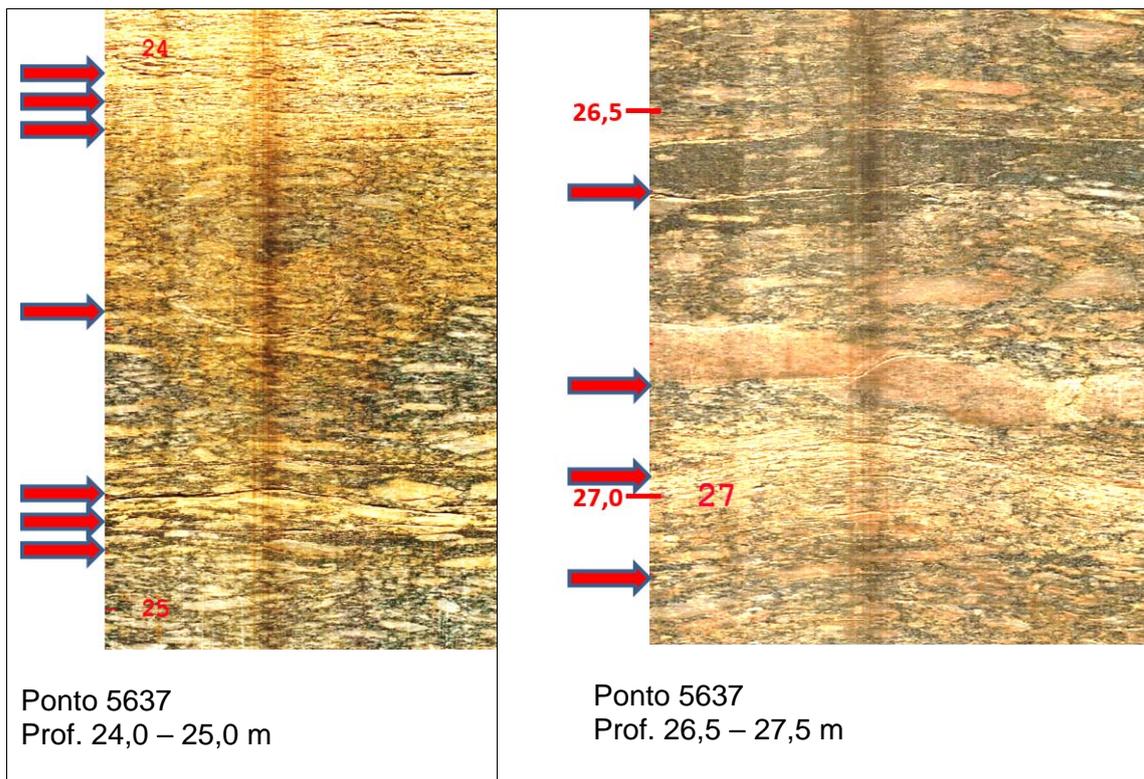
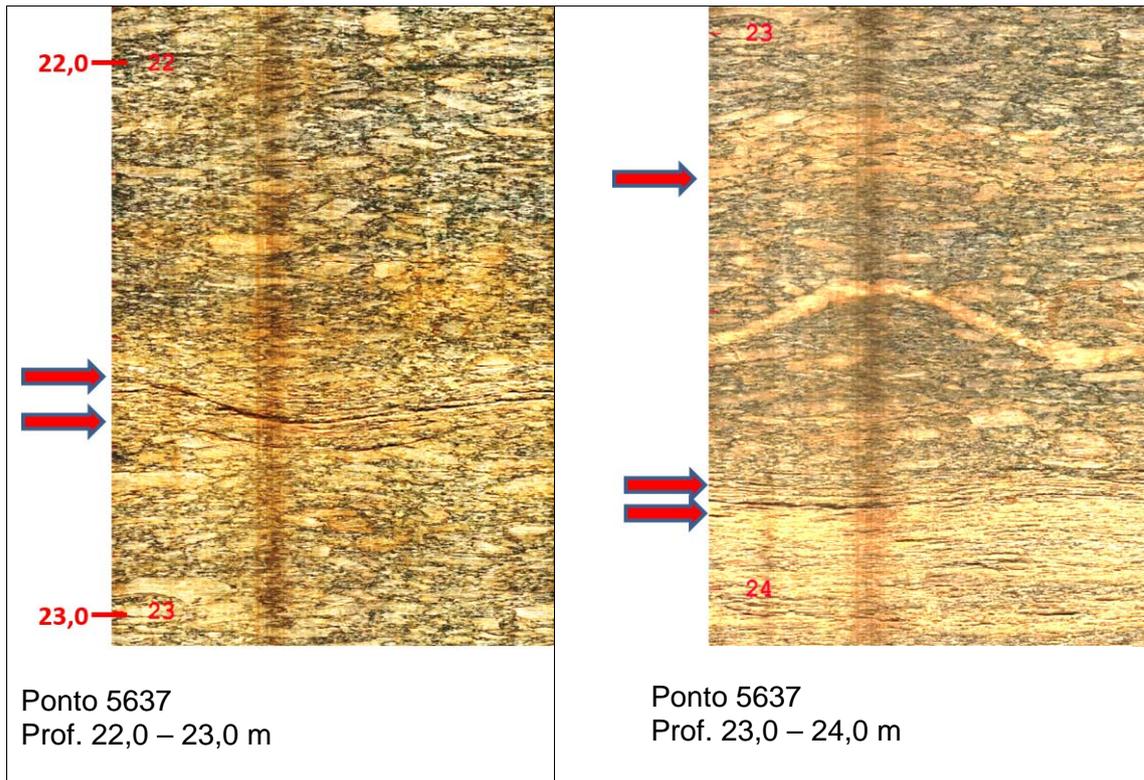


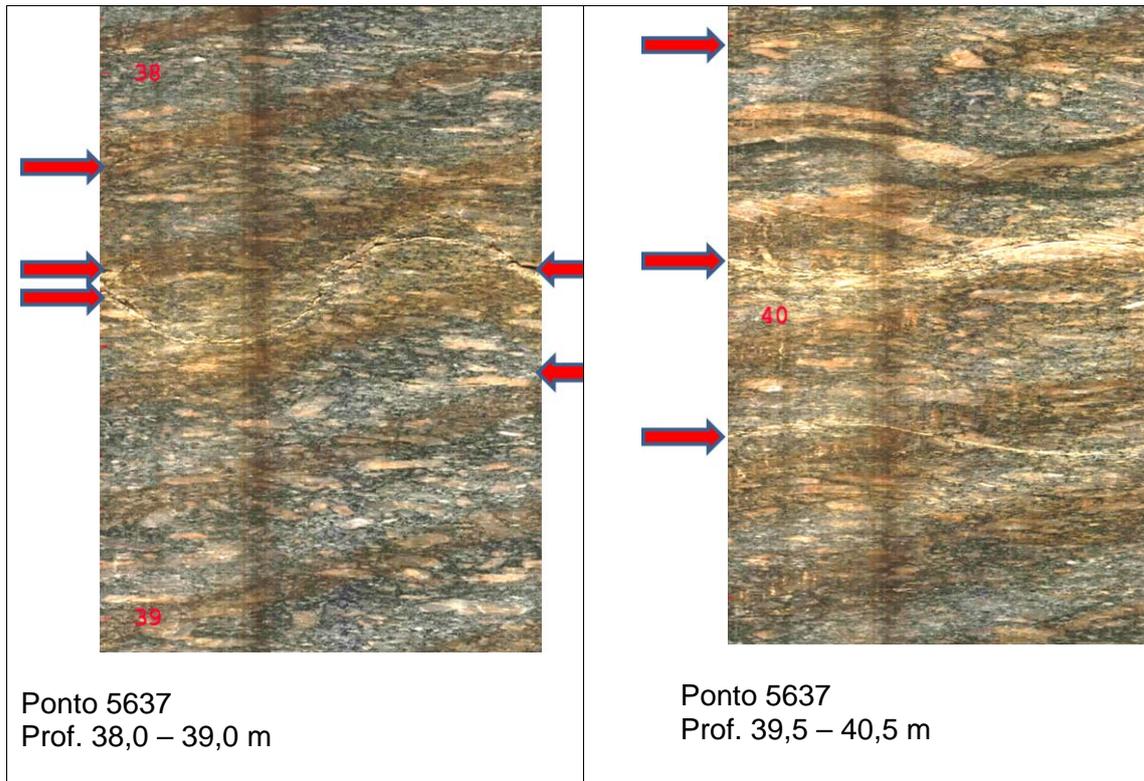
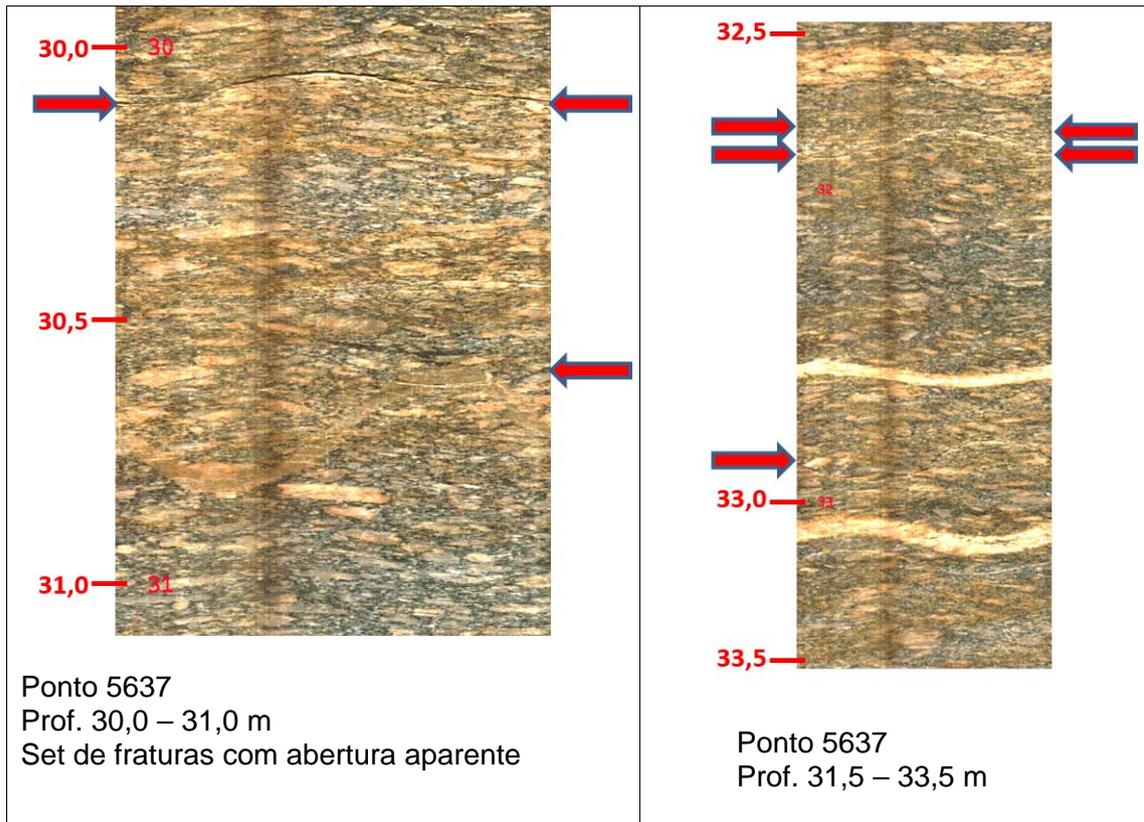
Ponto 5622
Prof. 44,0 - 46,0 m

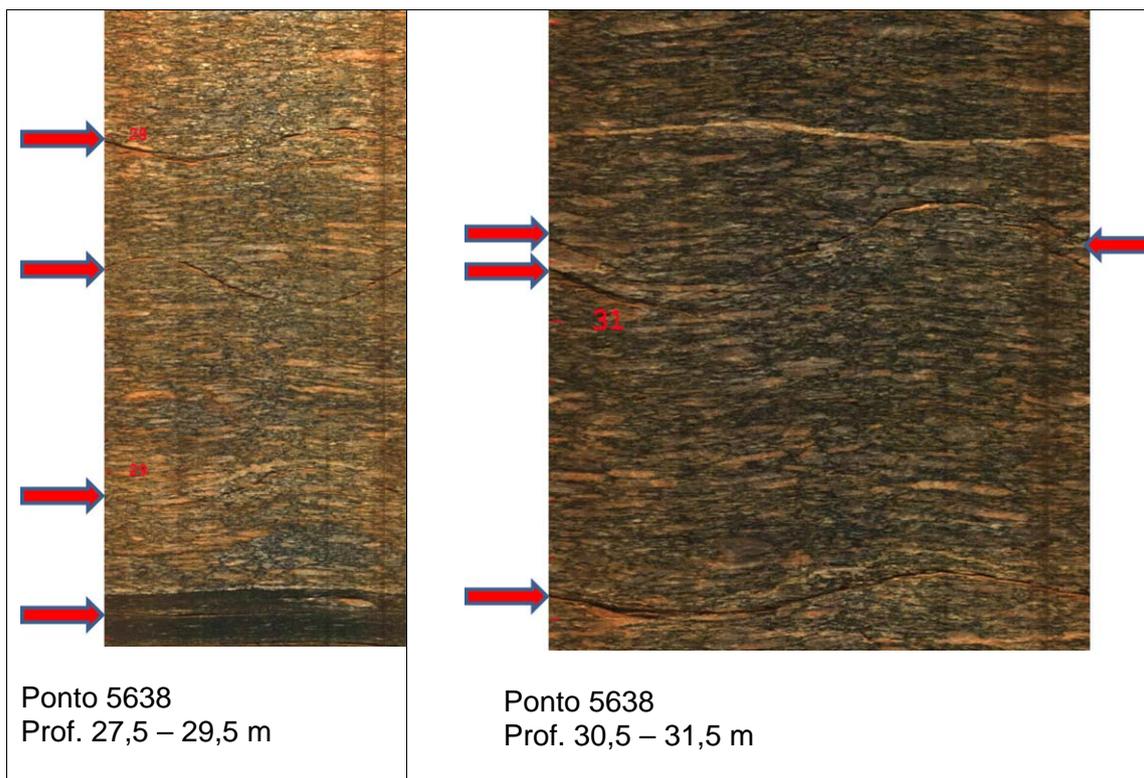
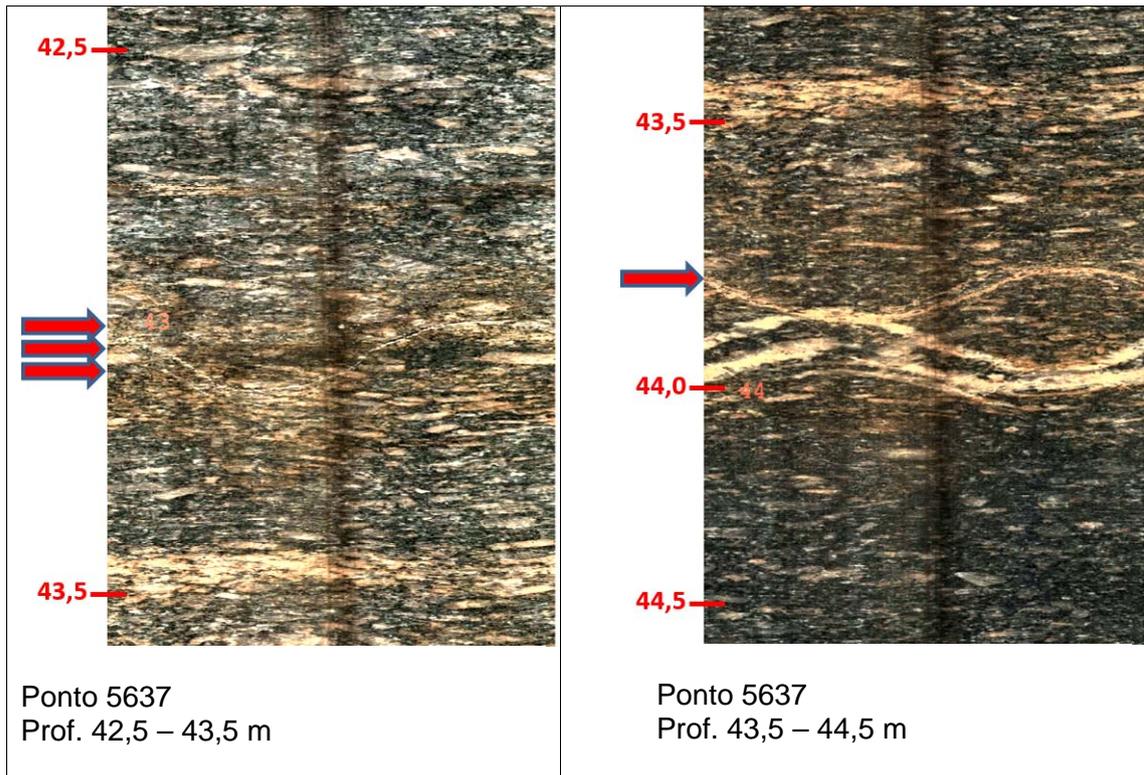


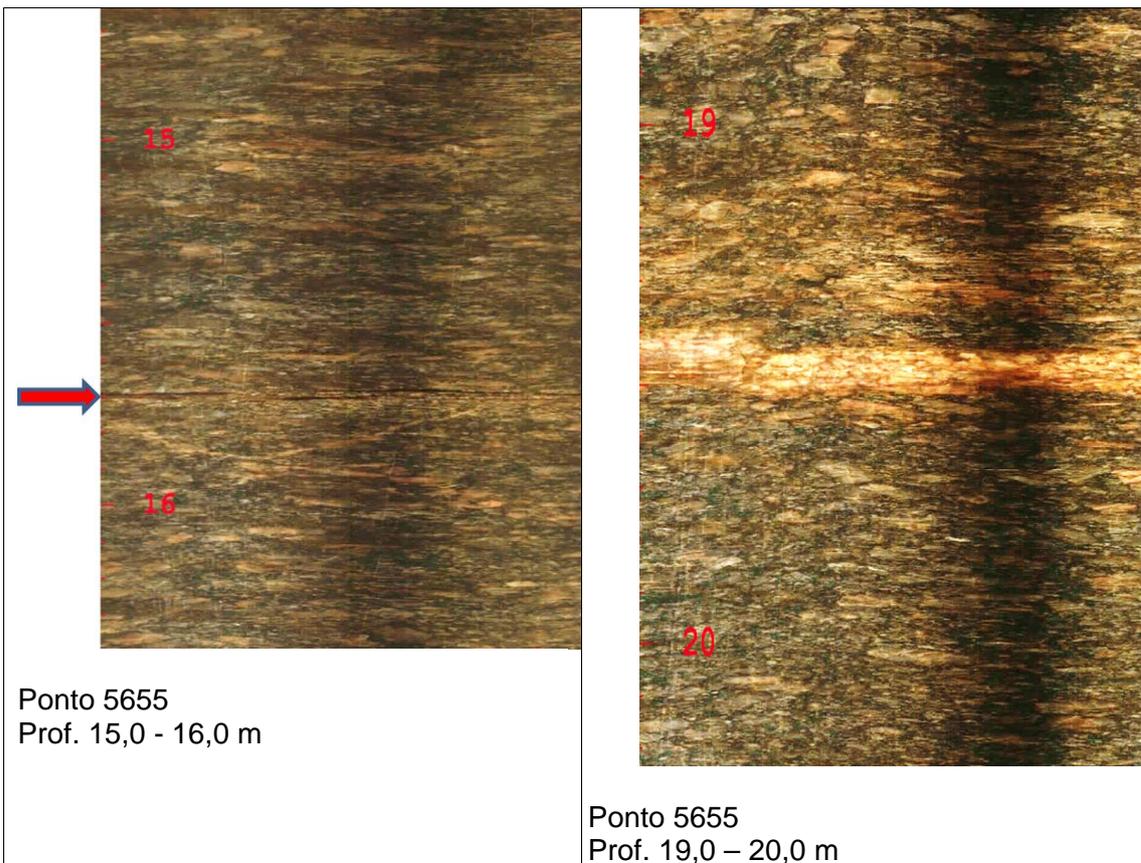
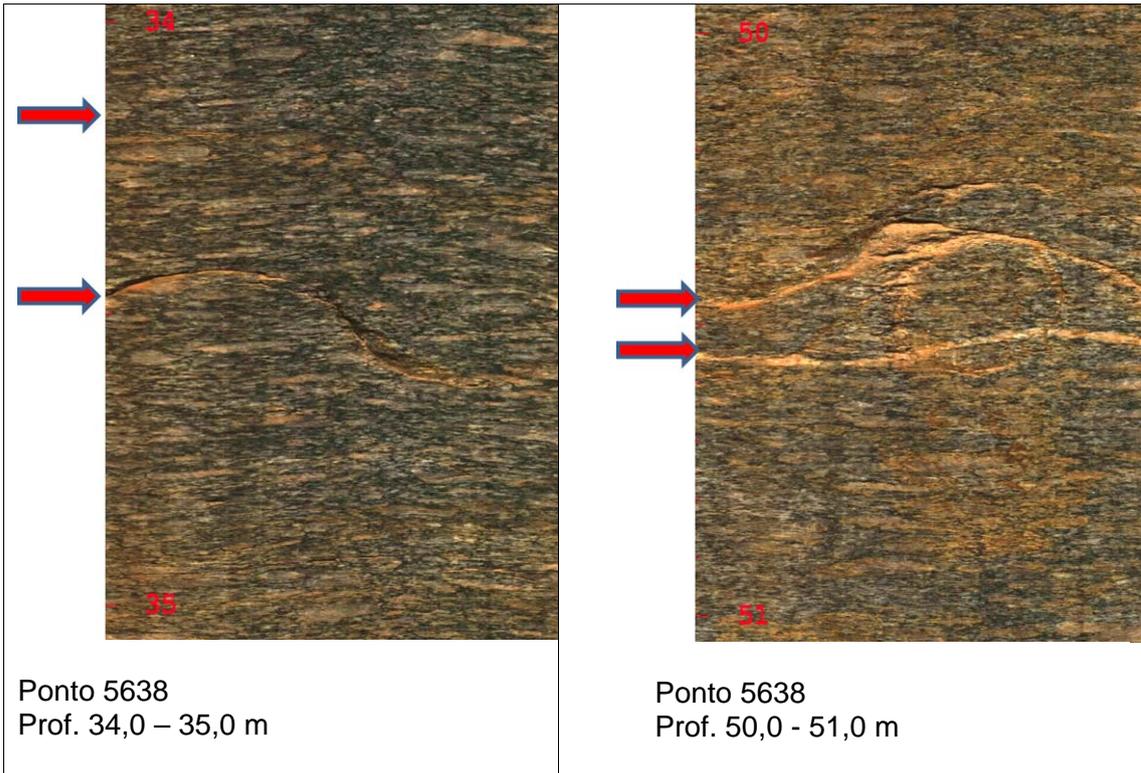
Ponto 5624
Prof. 20,0 - 21,0 m

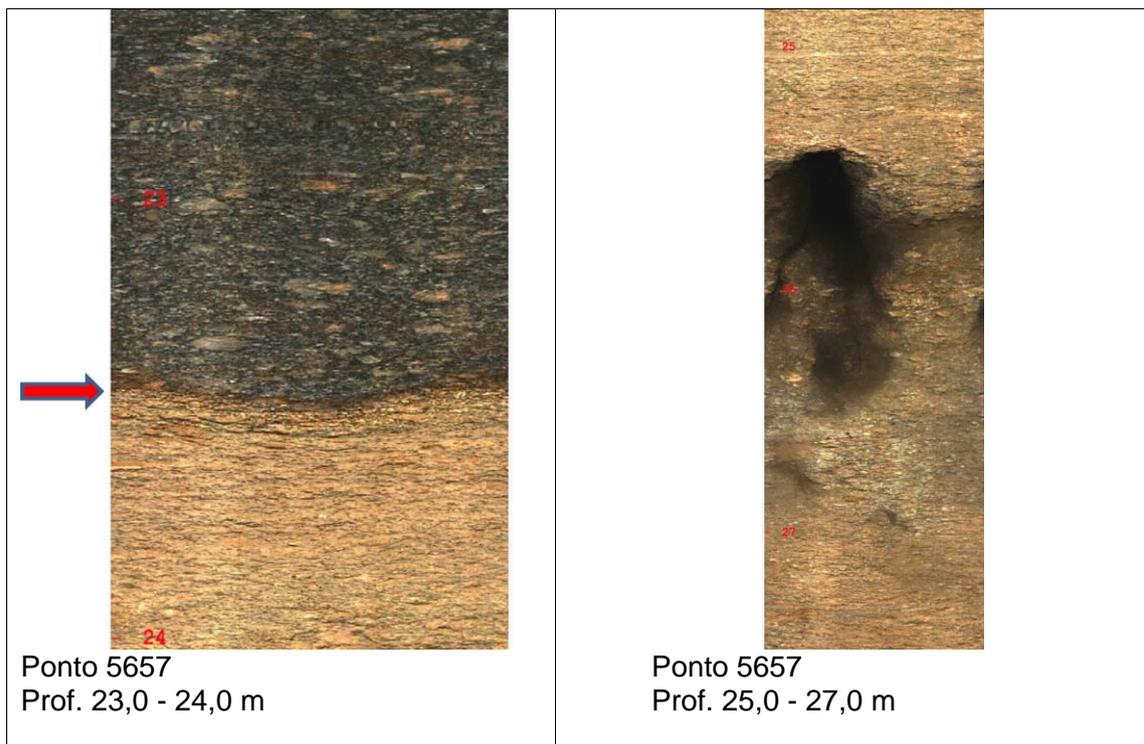
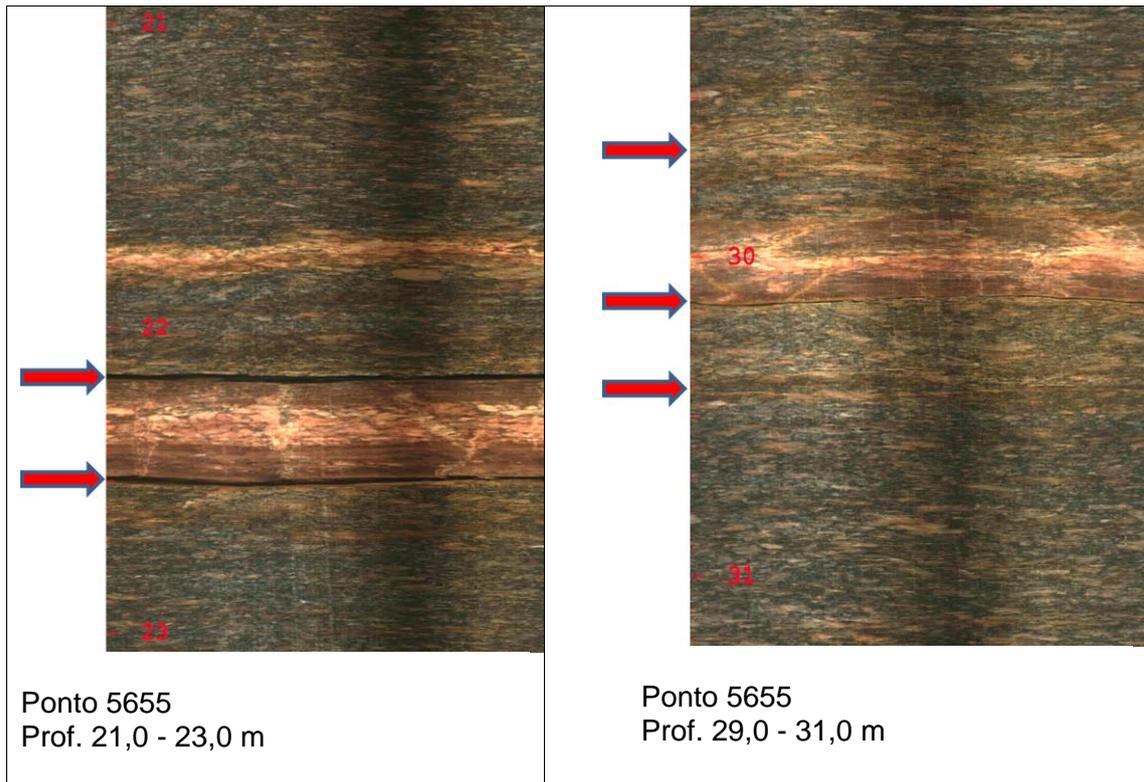






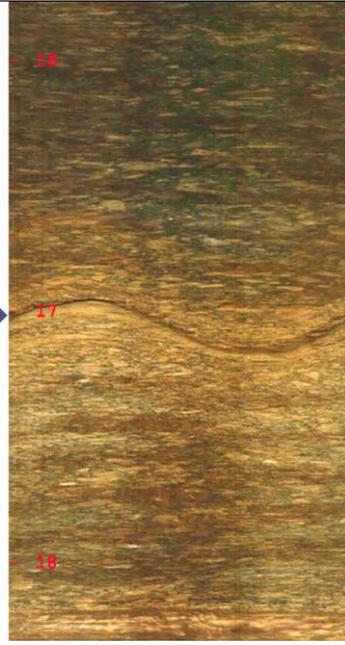




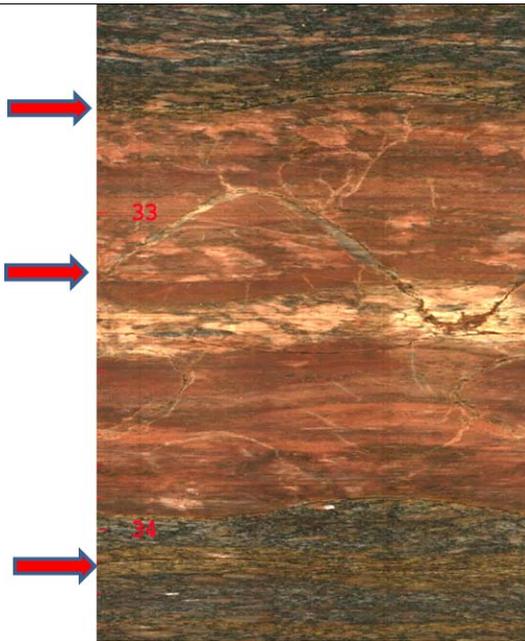




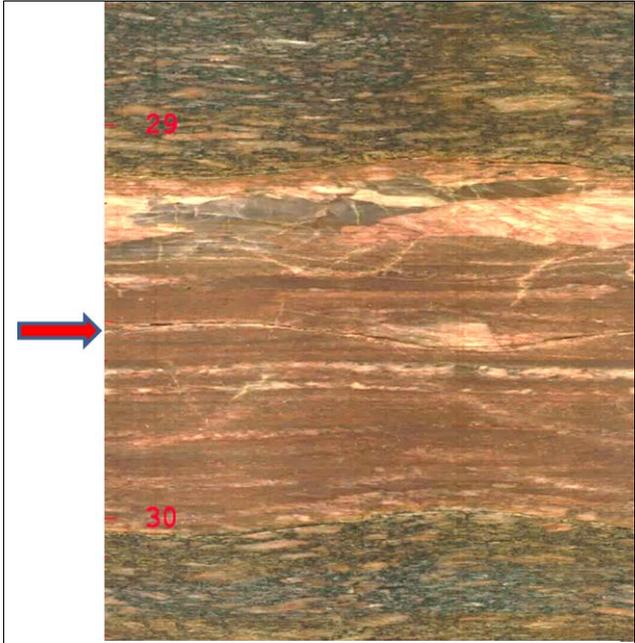
Ponto 5657
Prof. 33,0 - 34,0 m



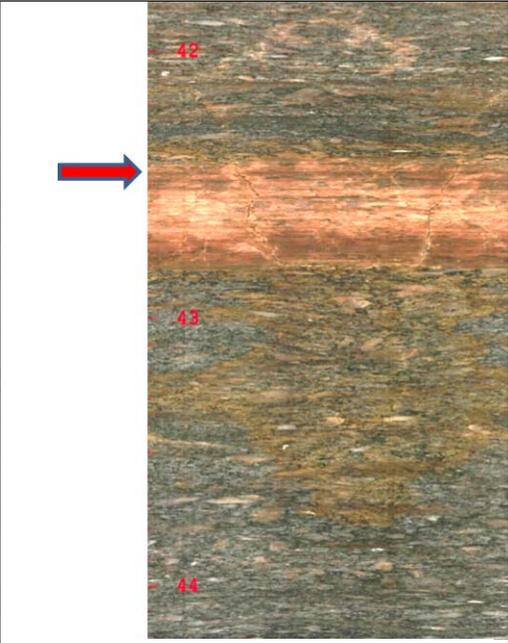
Ponto 5662
Prof. 16,5 - 17,5 m



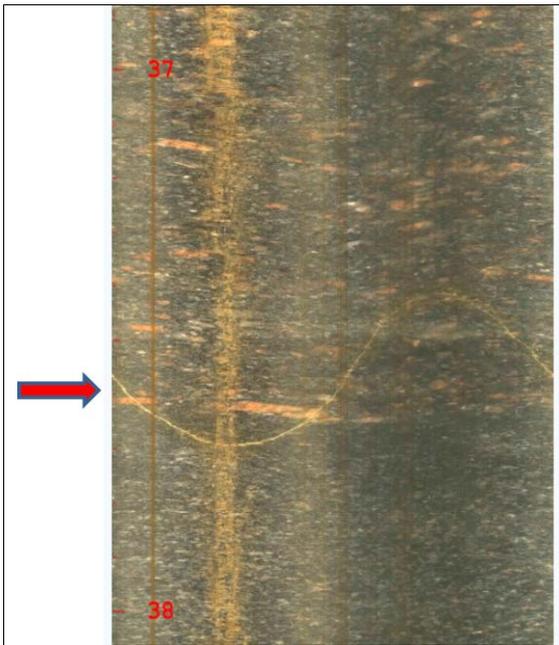
Ponto 5662
Prof. 32,0 - 34,0 m



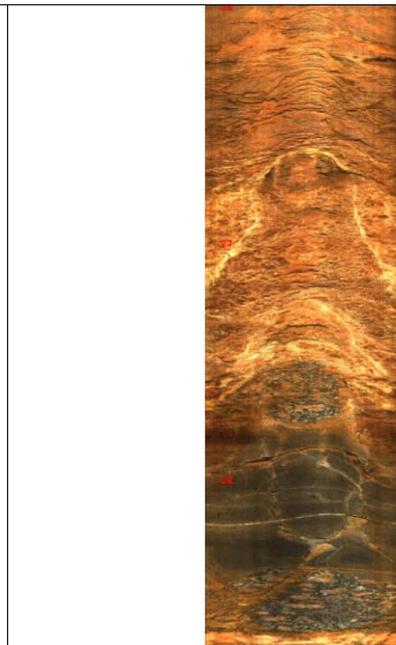
Ponto 5662
Prof. 29,0 – 30,0 m



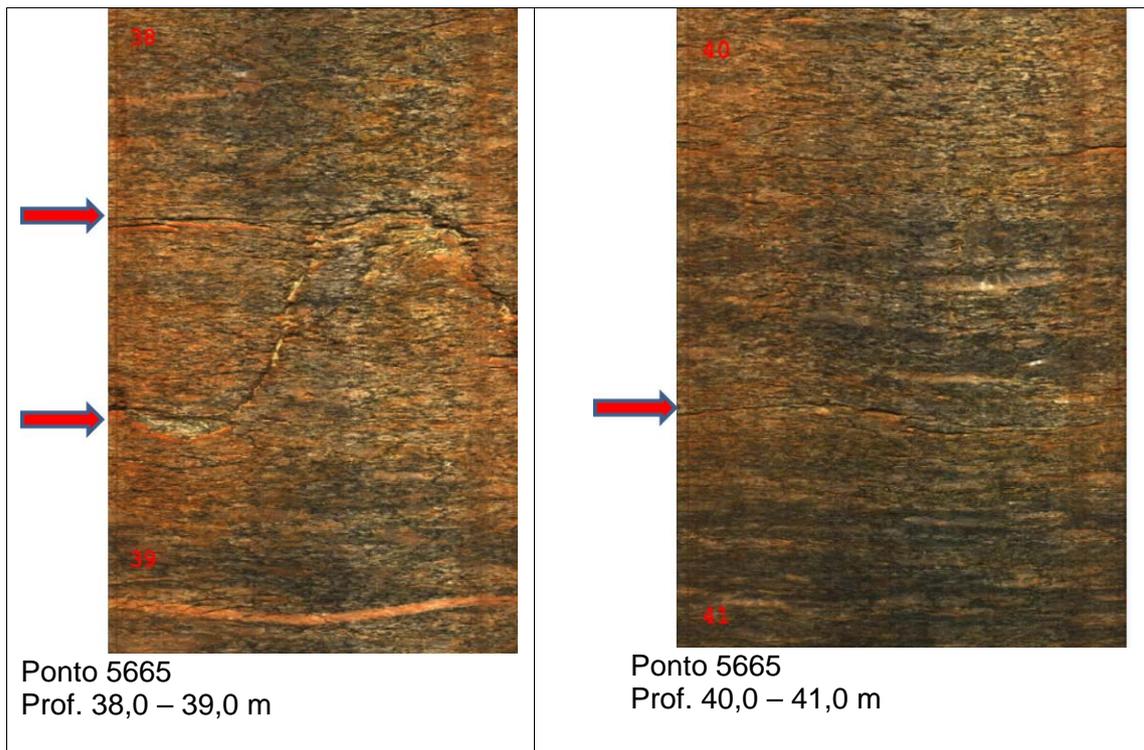
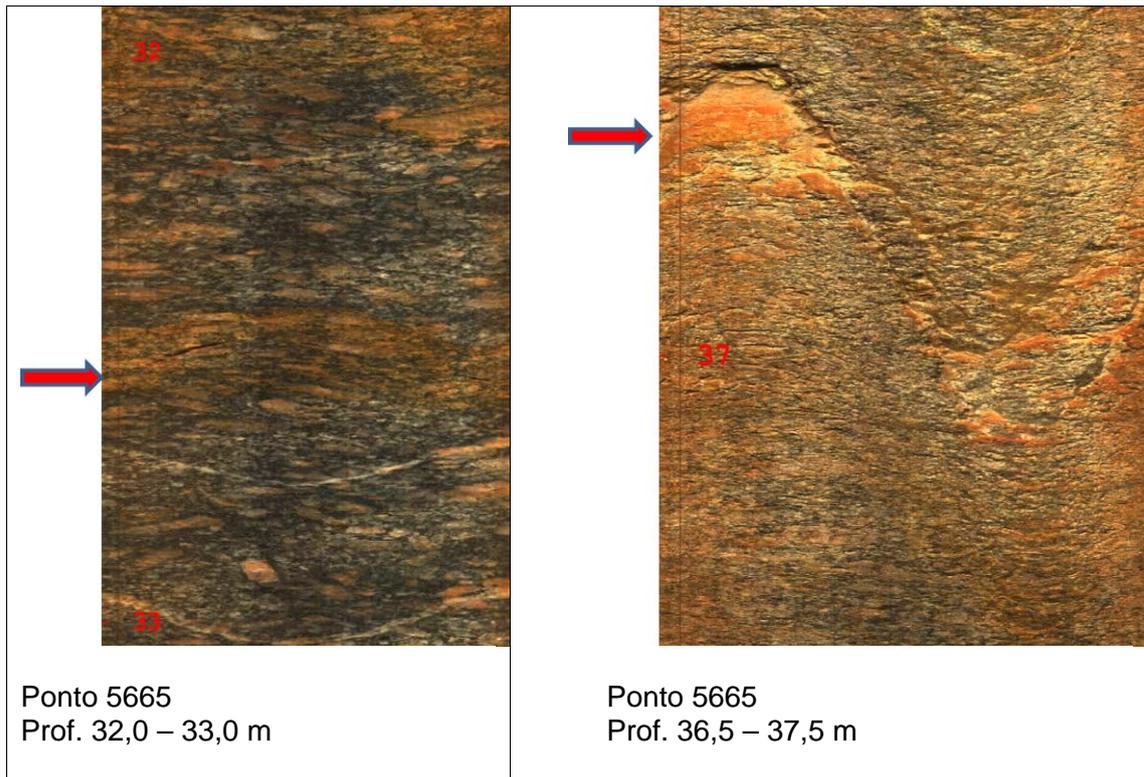
Ponto 5662
Prof. 42,0 – 44,0 m

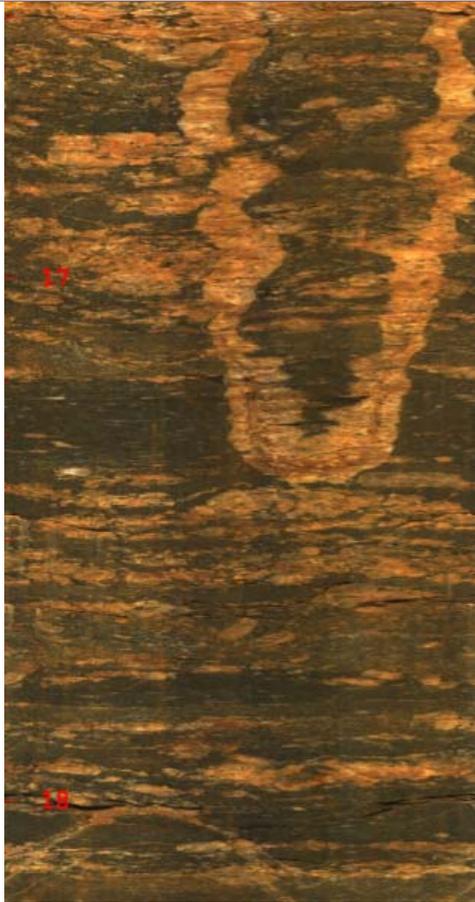


Ponto 5664
Prof. 37,0 – 38,0 m

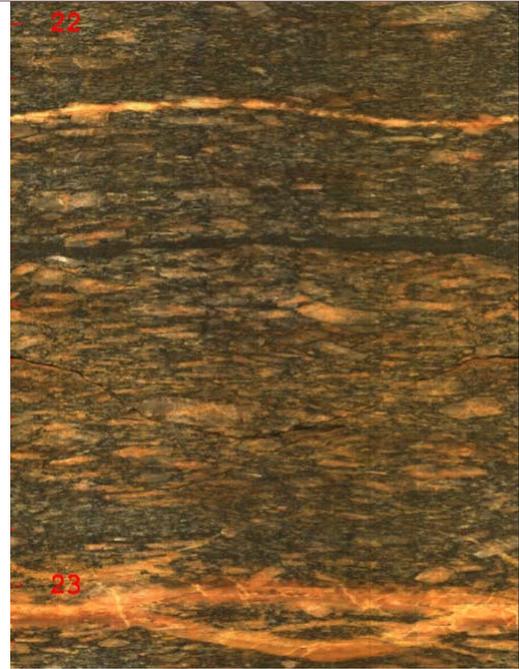


Ponto 5665
Prof. 26,0 – 29,0 m

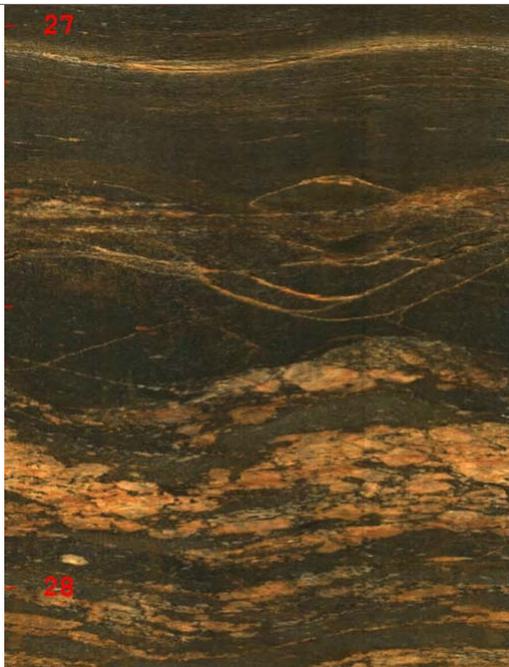




Ponto 5672
Prof. 15,5 - 18,5 m



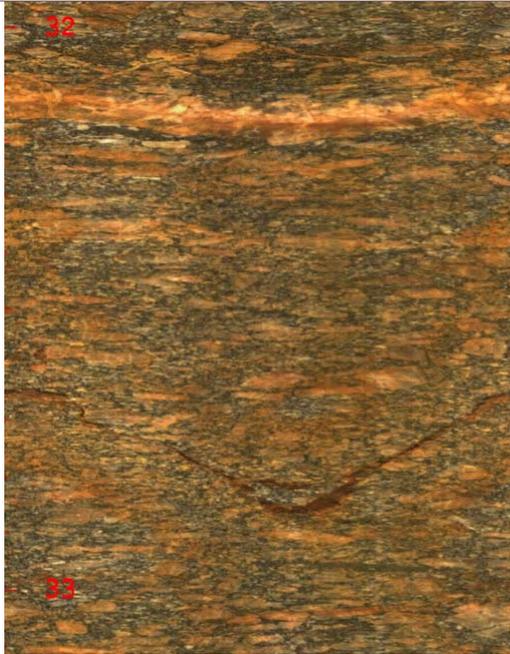
Ponto 5672
Prof. 22,0 - 23,0 m



Ponto 5672
Prof. 27,0 - 28,0 m



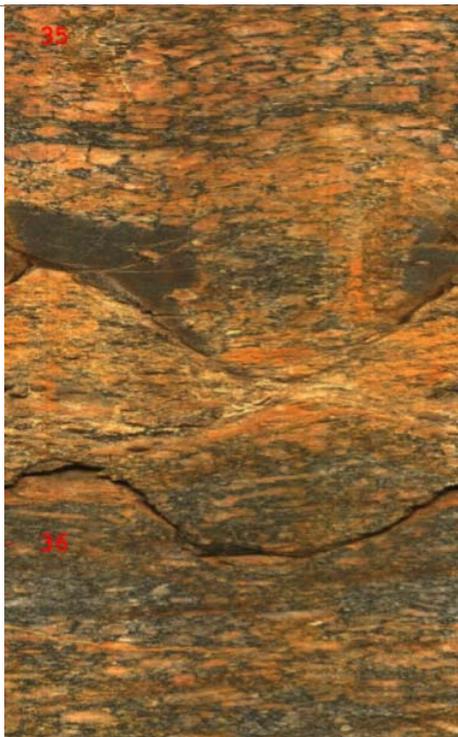
Ponto 5672
Prof. 31,0 - 32,0 m



Ponto 5672
Prof. 32,0 - 33,0 m



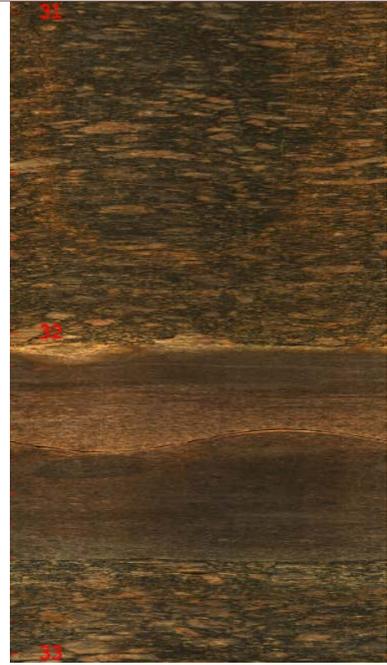
Ponto 5672
Prof. 33,0 - 34,0 m



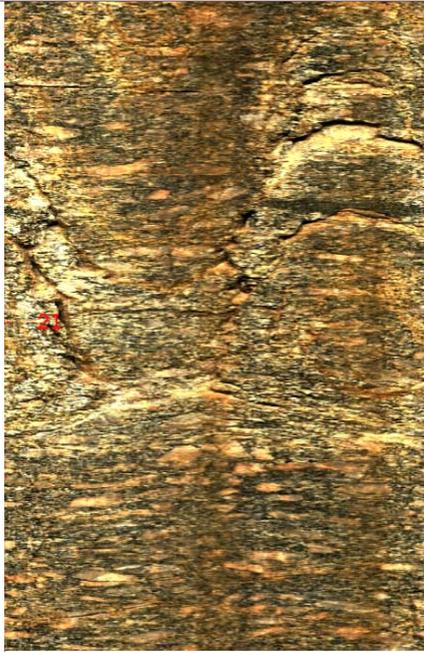
Ponto 5672
Prof. 35,0 - 37,0 m



Ponto 5674
Prof. 18,0 - 19,0 m



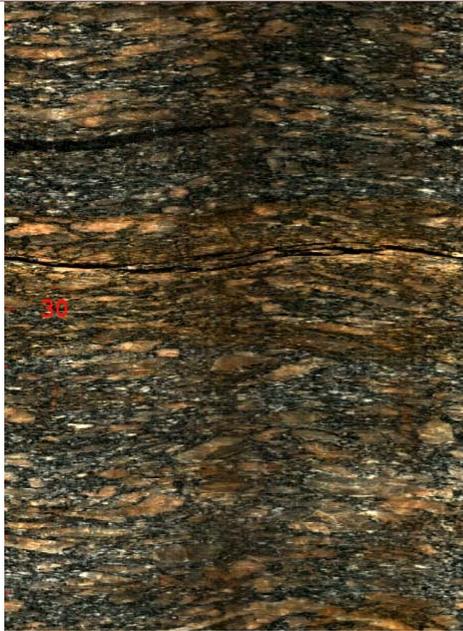
Ponto 5674
Prof. 31,0 - 33,0 m



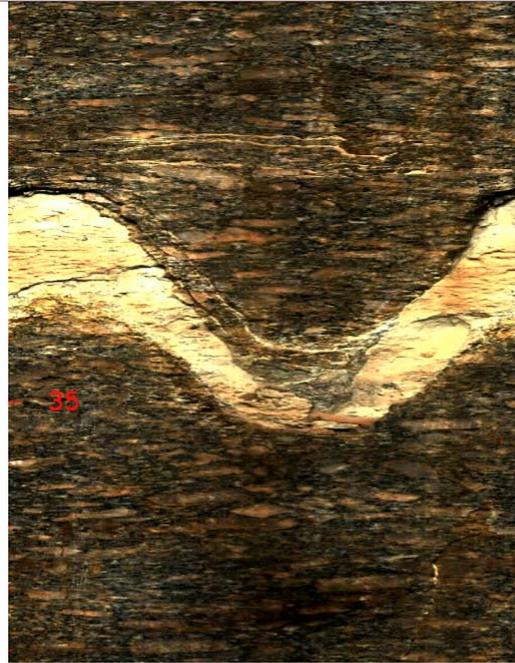
Ponto 5675
Ptof. 20,0 - 22,0 m



Ponto 5675
Prof. 22,0 - 25,0 m



Ponto 5675
Prof. 29,5 -30,5 m



Ponto 5675
Prof. 34,0 - 36,0 m



Ponto 5677
Prof. 10,0 - 13,0 m



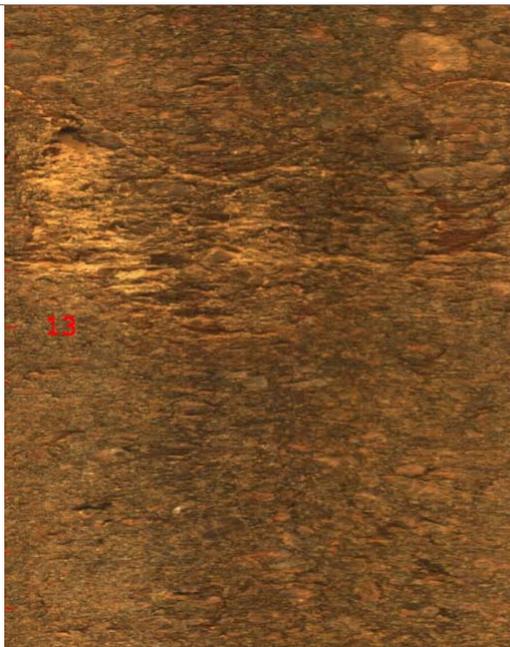
Ponto 5677
Prof. 20,0 - 22,0 m



Ponto 5678
Prof. 11,0 - 12,0 m



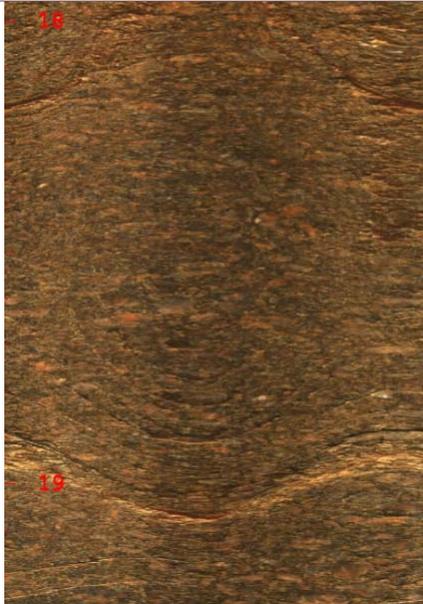
Ponto 5678
Prof. 12,0 - 15,0 m



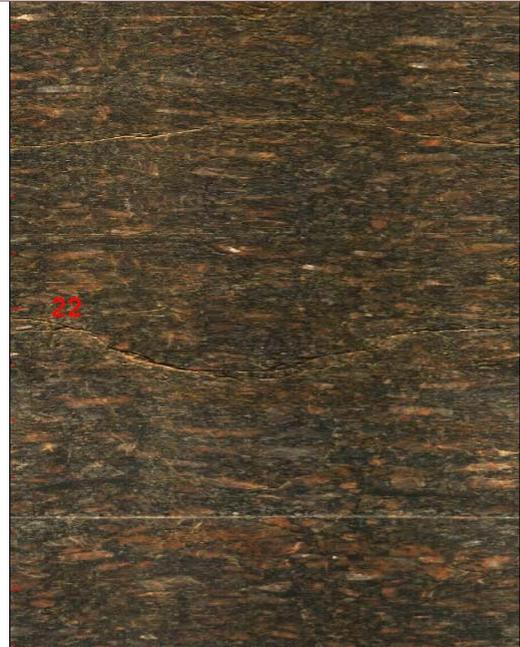
Ponto 5691
Prof. 12,5 -13,5 m



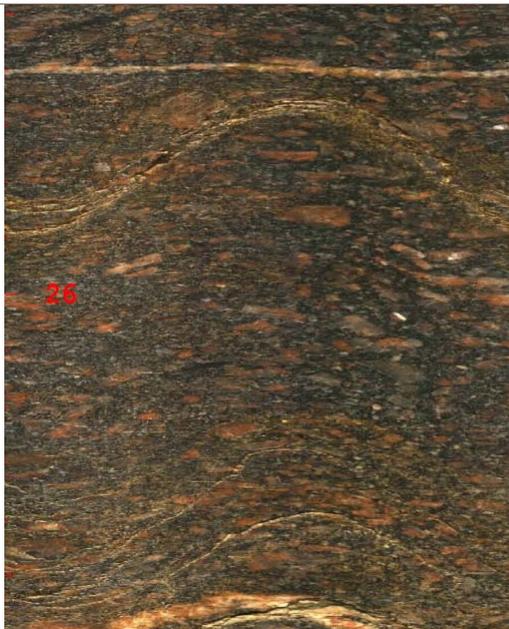
Ponto 5691
Prof. 14,0 - 17,0 m



Ponto 5691
Prof. 18,2 -19,2 m



Ponto 5691
Prof. 21,5 -22,5 m



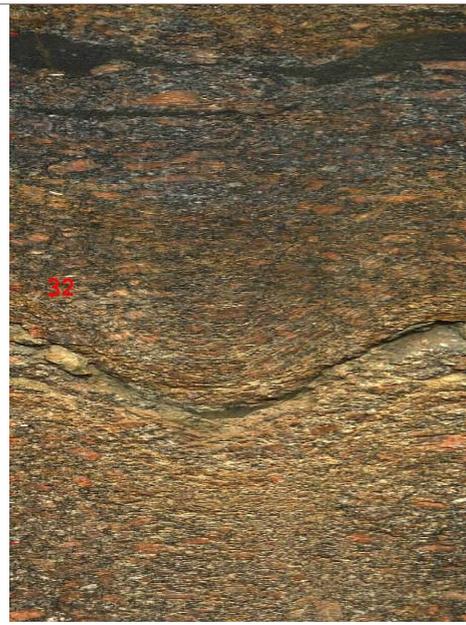
Ponto 5691
Prof. 25,5 - 26,5 m



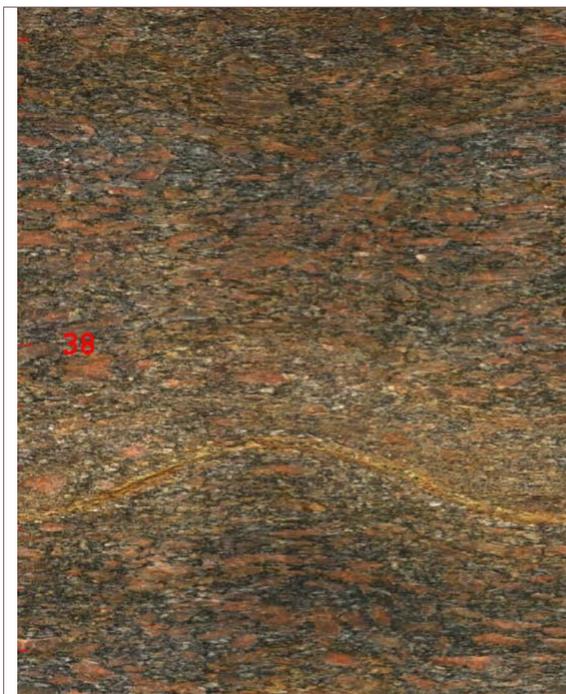
Ponto 5691
Prof. 26,0 - 28,0 m



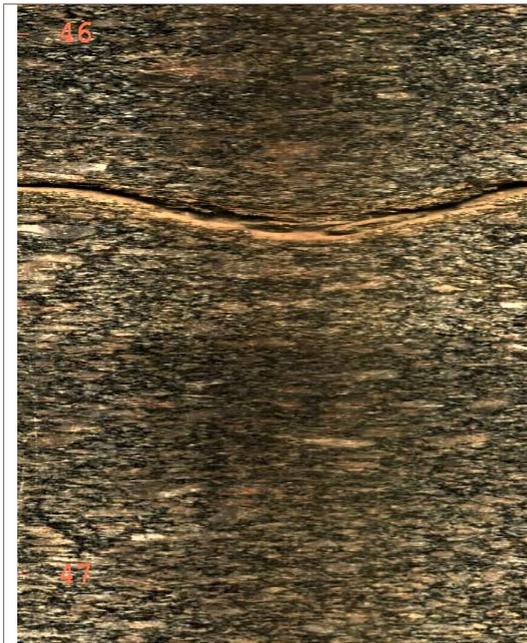
Ponto 5691
Prof. 28,0 - 29,0 m



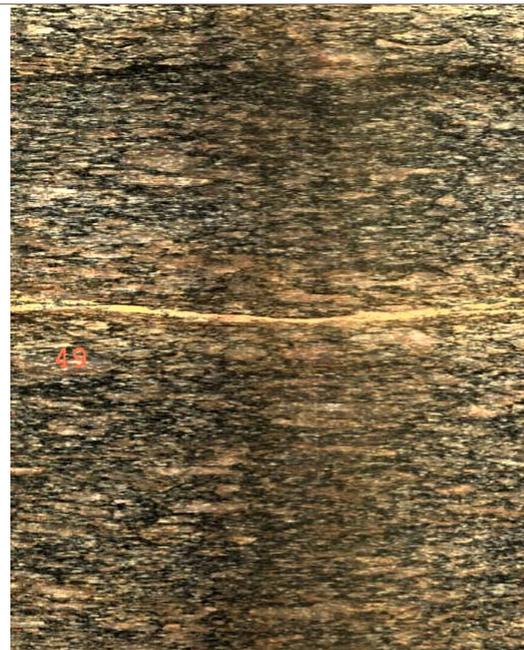
Ponto 5691
Prof. 31,5 -32,5 m



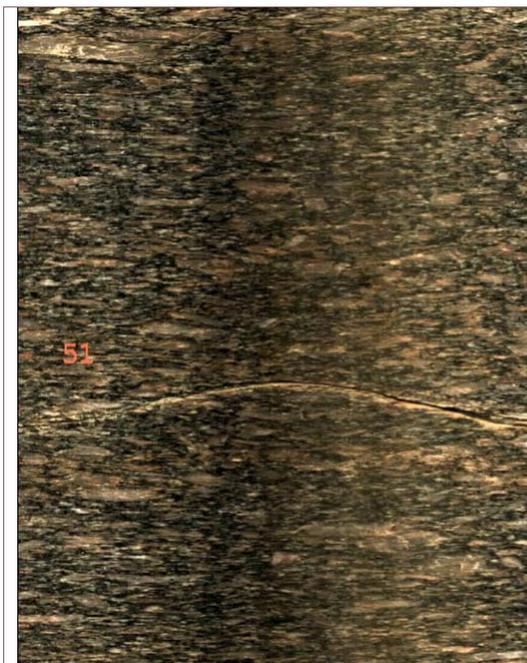
Ponto 5691
Prof. 37,5 - 38,5 m



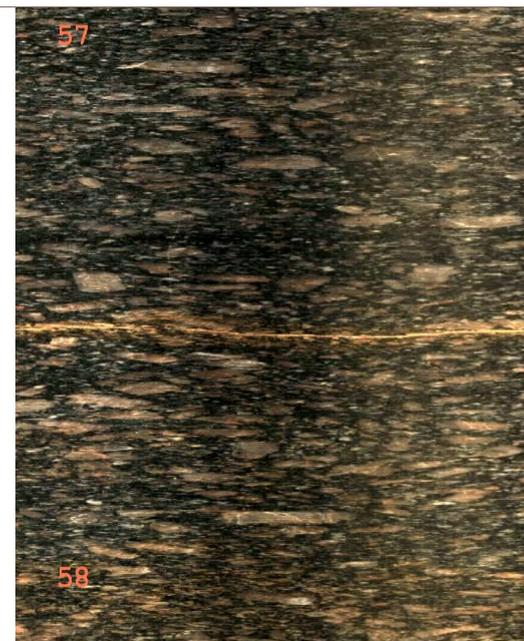
Ponto 5716
Prof. 46,0 - 47,0 m



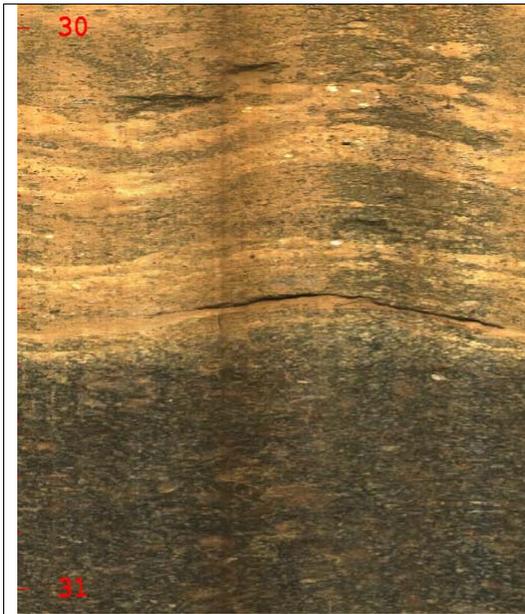
Ponto 5716
Prof. 48,5 - 49,5 m



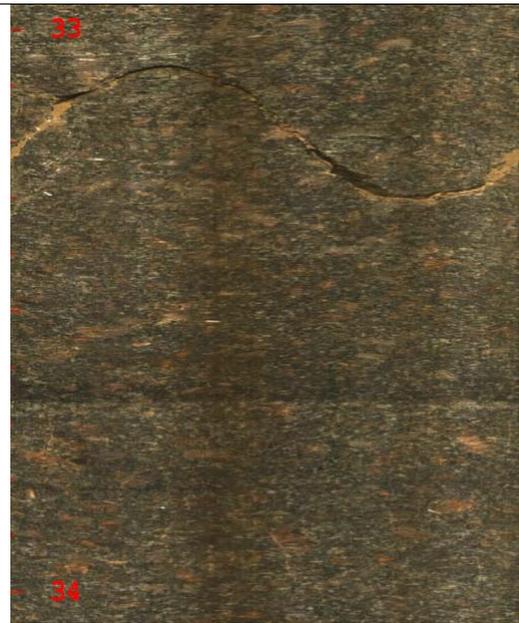
Ponto 5716
Prof. 50,5 - 51,5 m



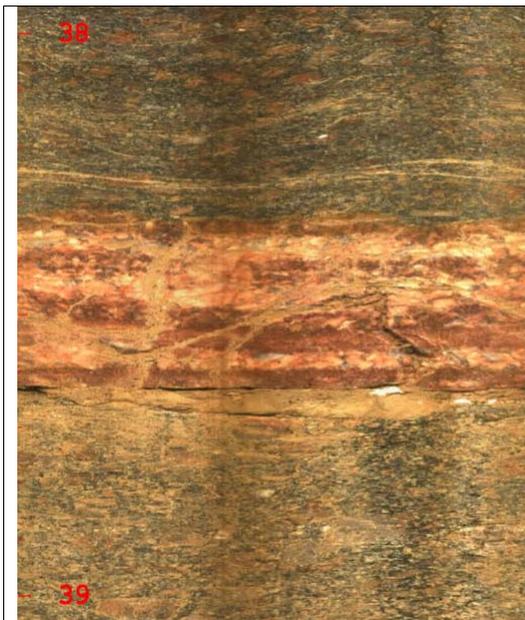
Ponto 5716
Prof. 57,0 - 58,0 m



Ponto 5718
Prof. 30,0 - 31,0 m



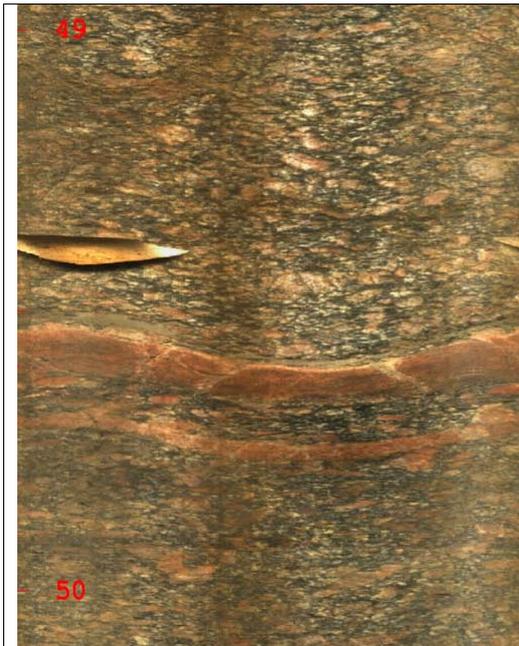
Ponto 5718
Prof. 33,0 - 34,0 m



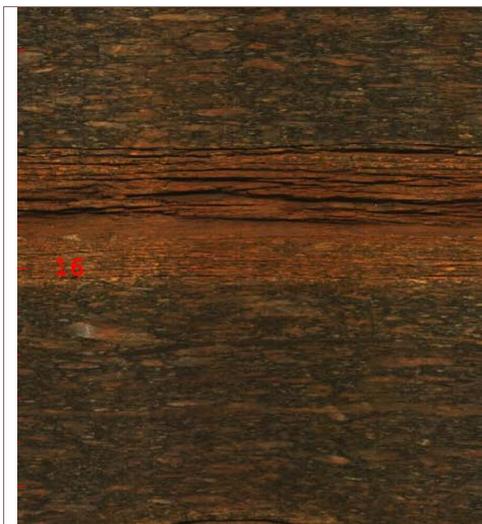
Ponto 5718
Prof. 38,0 - 39,0 m



Ponto 5718
Prof. 43,5 - 46,0 m



Ponto 5718
Prof. 49,0 - 50,0 m



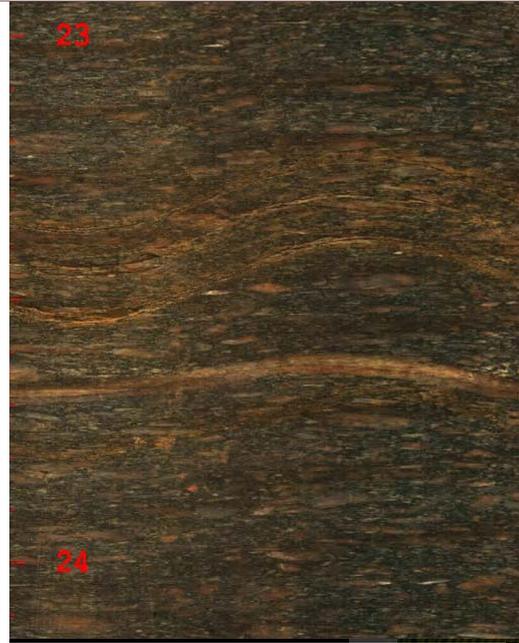
Ponto 5745
Prof. 15,5 - 16,5 m



Ponto 5745
Prof. 16,5 -17,5 m



Ponto 5745
Prof. 17,0 - 18,0 m



Ponto 5745
Prof. 23,0 - 24,0 m



Ponto 5745
Prof. 37,0 - 38,0 m

ANEXO 02 – CÁLCULOS REALIZADOS NOS ENSAIOS DE PERDA DE ÁGUA SOB PRESSÃO

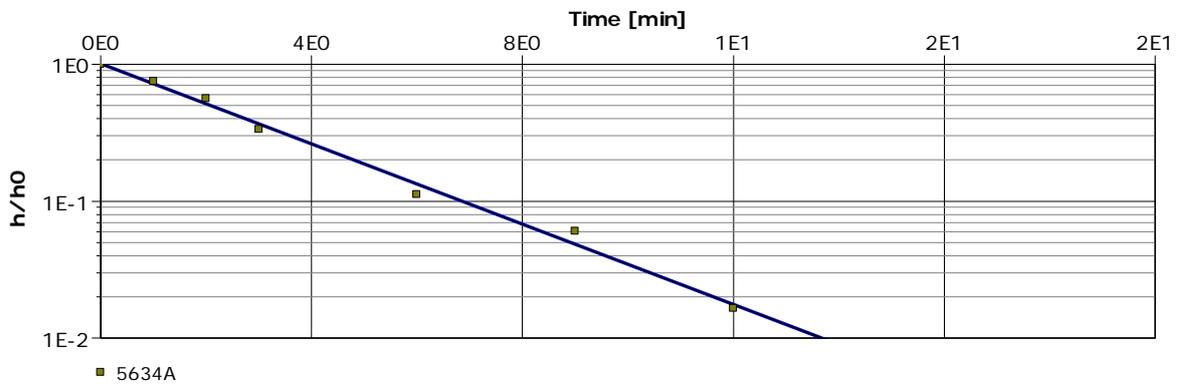
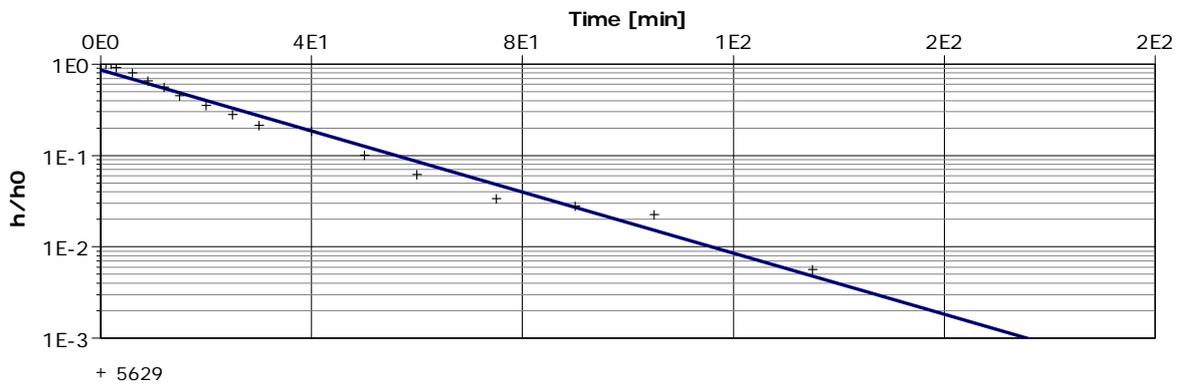
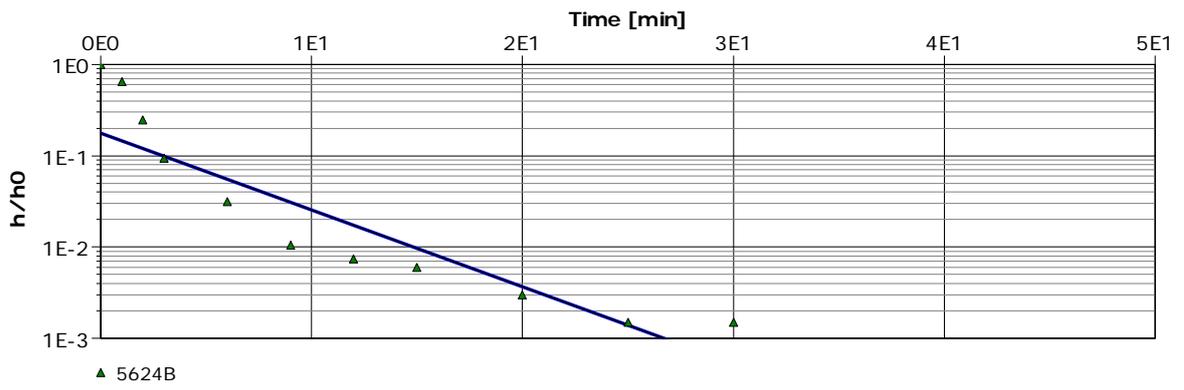
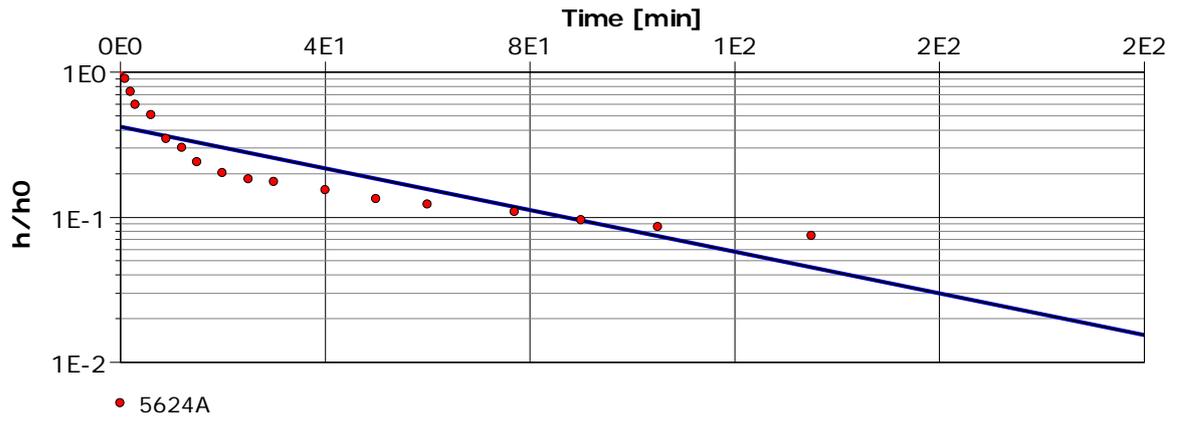
POÇO	ENSAIO NÚMERO	INTERVALO		INCL. C/ VERTICAL (GRAUS)	ESTÁGIO DE CARGA "Pm" (kg/cm ²)	VAZÃO MÉDIA "Q" (l/min)	TRECHO "L" (m)	CARGA COL H2O "H" (kg/cm ²)	PERDA DE CARGA Pc (kg/cm ²)	VAZÃO ESPECÍFICA "QE" (l/min/m)	CARGA EFETIVA "Ce" (kg/cm ²)	PERDA ESPEC. "PE" (l/min/m/kg/cm ²)	COEFICIENTE DE FORMA "Cf" adimensional	FATOR DE CORREÇÃO	PERMEAB. "K" (cm/s)
		INÍCIO	FINAL												
5621	1	29,00	31,00	0°	0,10	0,003	2,00	6,50	1,20E-09	0,00	0,75	0,00200	3,551756036	9,38E-05	1,88E-07
	2	34,00	36,00	0°	0,10	0,000	2,00	5,77	0,00E+00	-----	0,68	-----	3,551756036	9,38E-05	-----
	3	37,00	39,00	0°	0,10	0,000	2,00	5,60	0,00E+00	-----	0,66	-----	3,551756036	9,38E-05	-----
	4	39,00	40,00	0°	0,10	0,000	1,00	5,78	0,00E+00	-----	0,68	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	5	42,00	44,00	0°	0,10	0,000	2,00	5,66	0,00E+00	-----	0,67	-----	3,551756036	9,38E-05	-----
	6	47,00	48,00	0°	0,10	0,000	1,00	6,45	0,00E+00	-----	0,75	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
5624	1	20,00	21,00	0°	0,10	0,000	1,00	8,22	0,00E+00	-----	0,92	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	2	25,00	26,00	0°	0,10	0,000	1,00	7,47	0,00E+00	-----	0,85	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	3	28,00	30,00	0°	0,10	0,005	2,00	7,44	3,59E-09	0,00	0,84	0,00296	3,551756036	9,38E-05	2,78E-07
	4	32,50	33,50	0°	0,10	0,000	1,00	7,44	0,00E+00	-----	0,84	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
5628	1	17,00	20,00	0°	0,10	0,000	3,00	2,95	0,00E+00	-----	0,40	-----	3,957221144	1,05E-04	-----
	2	22,00	25,00	0°	0,10	0,000	3,00	3,19	0,00E+00	-----	0,42	-----	3,957221144	1,05E-04	-----
	3	27,00	30,00	0°	0,10	0,000	3,00	3,65	0,00E+00	-----	0,47	-----	3,957221144	1,05E-04	-----
5631	1	17,00	20,00	18°	0,10	0,000	3,00	1,83	0,00E+00	-----	0,28	-----	3,957221144	1,05E-04	-----
	2	22,00	25,00	18°	0,10	0,000	3,00	1,90	0,00E+00	-----	0,29	-----	3,957221144	1,05E-04	-----
5637	1	19,50	20,50	0°	0,10	0,065	1,00	11,64	6,97E-07	0,07	1,26	0,05142	2,858608855	7,55E-05	3,88E-06
	2	20,00	21,00	0°	0,10	0,090	1,00	11,61	1,28E-06	0,09	1,26	0,07137	2,858608855	7,55E-05	5,39E-06
	3	22,00	23,00	0°	0,10	0,030	1,00	11,38	1,59E-07	0,03	1,24	0,02423	2,858608855	7,55E-05	1,83E-06
	4	23,00	24,00	0°	0,10	2,350	1,00	11,38	5,79E-04	2,35	1,24	1,89911	2,858608855	7,55E-05	1,43E-04
	5	24,00	25,00	0°	0,10	0,430	1,00	11,34	2,37E-05	0,43	1,23	0,34847	2,858608855	7,55E-05	2,63E-05
	7	26,50	27,50	0°	0,10	0,000	1,00	11,57	0,00E+00	-----	1,26	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	8	30,00	31,00	0°	0,10	0,000	1,00	11,32	0,00E+00	-----	1,23	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	9	31,50	33,50	0°	0,10	0,000	2,00	12,04	0,00E+00	-----	1,30	-----	3,551756036	9,38E-05	-----
	10	34,00	35,00	0°	0,10	0,000	1,00	11,42	0,00E+00	-----	1,24	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	11	38,00	39,00	0°	0,10	0,000	1,00	11,38	0,00E+00	-----	1,24	-----	2,858608855	7,55E-05	-----

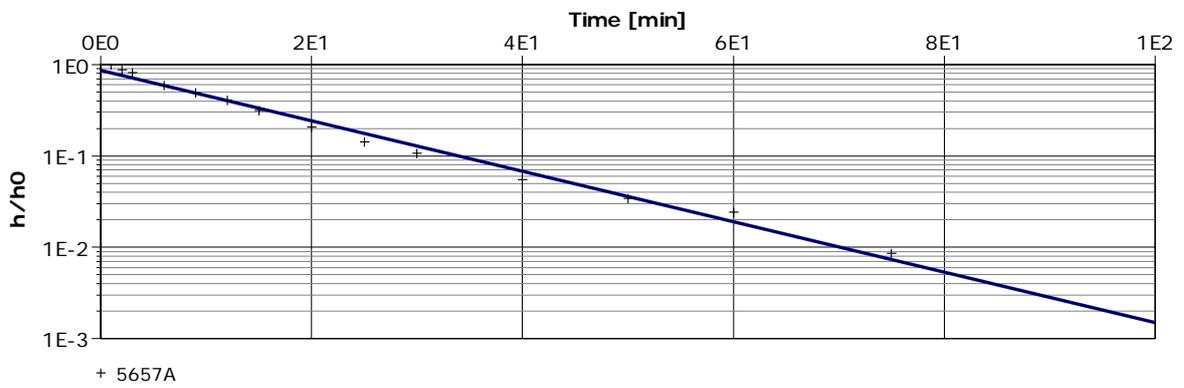
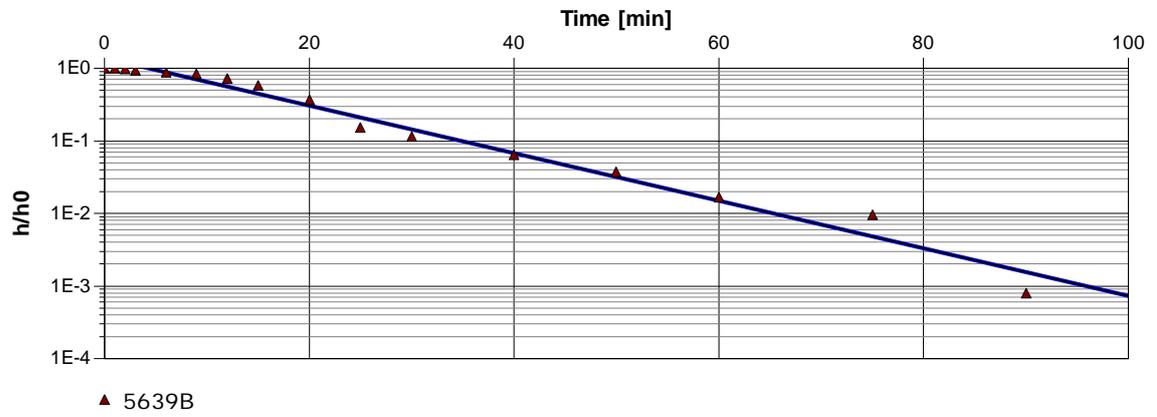
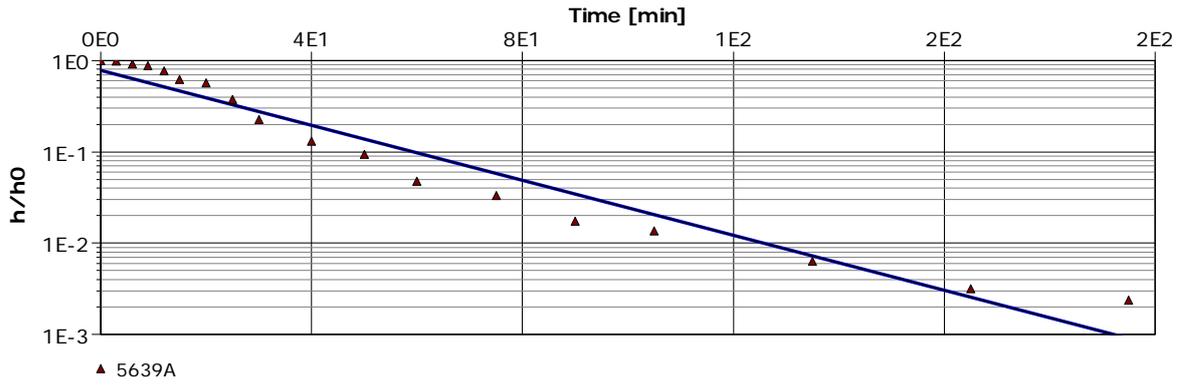
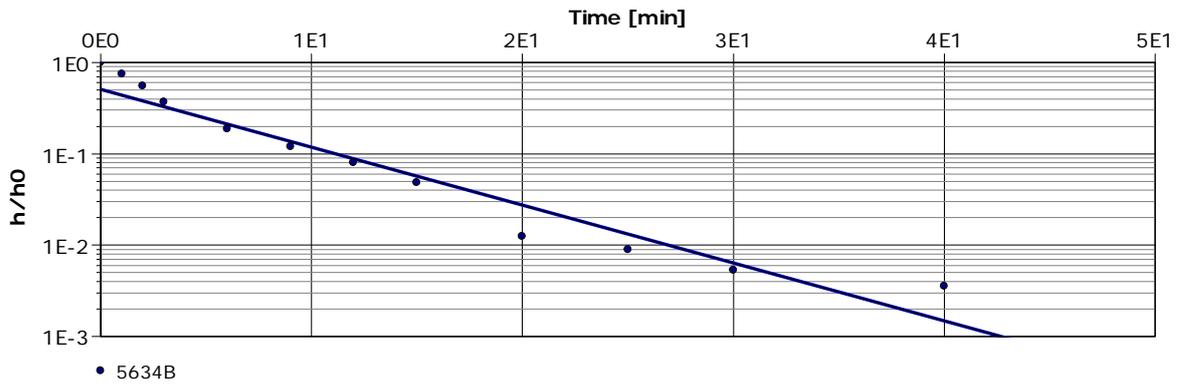
	12	39,50	40,50	0°	0,10	0,000	1,00	11,67	0,00E+00	-----	1,27	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	13	42,50	43,50	0°	0,10	0,000	1,00	11,34	0,00E+00	-----	1,23	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	14	43,50	44,50	0°	0,10	0,000	1,00	11,38	0,00E+00	-----	1,24	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
5638	1	27,50	29,50	0°	0,10	0,000	2,00	17,30	0,00E+00	-----	1,83	-----	3,551756036	9,38E-05	-----
	2	30,50	31,50	0°	0,10	0,000	1,00	16,95	0,00E+00	-----	1,80	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	3	34,00	35,00	0°	0,10	0,000	1,00	17,20	0,00E+00	-----	1,82	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	6	36,00	38,00	0°	0,10	0,000	2,00	17,27	0,00E+00	-----	1,83	-----	3,551756036	9,38E-05	-----
	7	38,00	39,00	0°	0,10	0,000	1,00	17,38	0,00E+00	-----	1,84	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	9	44,00	46,00	0°	0,10	0,000	2,00	17,45	0,00E+00	-----	1,85	-----	3,551756036	9,38E-05	-----
	10	50,00	51,00	0°	0,10	0,000	1,00	17,70	0,00E+00	-----	1,87	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
5657	1	23,00	24,00	0°	0,10	0,610	1,00	8,24	3,32E-05	0,61	0,92	0,66020	2,858608855	7,55E-05	4,99E-05
	2	23,50	24,50	0°	0,10	1,000	1,00	9,13	9,33E-05	1,00	1,01	0,98726	2,858608855	7,55E-05	7,46E-05
	3	25,00	27,00	0°	0,10	1,200	2,00	8,83	1,27E-04	0,60	0,98	0,61046	3,551756036	9,38E-05	5,73E-05
	4	29,00	30,00	0°	0,10	1,400	1,00	8,68	1,67E-04	1,40	0,97	1,44653	2,858608855	7,55E-05	1,09E-04
	5	31,00	32,00	0°	0,10	1,400	1,00	8,58	1,65E-04	1,40	0,96	1,46163	2,858608855	7,55E-05	1,10E-04
	6	32,50	34,50	0°	0,10	1,800	2,00	8,31	2,56E-04	0,90	0,93	0,96697	3,551756036	9,38E-05	9,07E-05
	7	37,00	38,00	0°	0,10	0,700	1,00	8,58	4,48E-05	0,70	0,96	0,73072	2,858608855	7,55E-05	5,52E-05
5662	1	16,50	17,50	0°	0,10	0,000	1,00	10,06	0,00E+00	-----	1,11	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	2	29,00	31,00	0°	0,10	0,000	2,00	10,52	0,00E+00	-----	1,15	-----	3,551756036	9,38E-05	-----
	3	32,00	34,00	0°	0,10	0,000	2,00	10,54	0,00E+00	-----	1,15	-----	3,551756036	9,38E-05	-----
	4	42,00	43,00	0°	0,10	0,000	1,00	10,06	0,00E+00	-----	1,11	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
5664	1	28,00	31,00	20°	0,10	0,000	3,00	0,00	0,00E+00	-----	0,10	-----	3,957221144	1,05E-04	-----
	2	29,00	30,00	20°	0,10	0,000	1,00	0,00	0,00E+00	-----	0,10	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	3	30,00	31,00	20°	0,10	0,000	1,00	0,00	0,00E+00	-----	0,10	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	4	32,50	33,50	20°	0,10	0,000	1,00	12,18	0,00E+00	-----	1,32	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	5	36,00	37,00	20°	0,10	0,000	1,00	12,66	0,00E+00	-----	1,37	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	6	37,00	38,00	20°	0,10	0,000	1,00	12,64	0,00E+00	-----	1,36	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
5665	1	32,00	33,00	0°	0,10	0,000	1,00	12,18	0,00E+00	-----	1,32	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	2	35,00	36,00	0°	0,10	0,000	1,00	12,14	0,00E+00	-----	1,31	-----	2,858608855	7,55E-05	-----

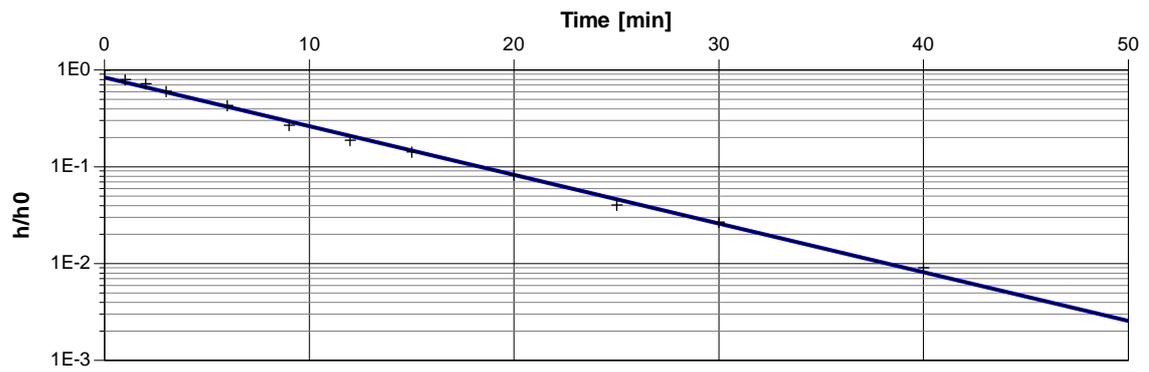
	3	36,50	37,50	0°	0,10	0,170	1,00	12,14	4,43E-06	0,17	1,31	0,12938	2,858608855	7,55E-05	9,77E-06
	4	38,00	39,00	0°	0,10	1,470	1,00	12,55	2,64E-04	1,47	1,35	1,08508	2,858608855	7,55E-05	8,19E-05
	5	40,00	41,00	0°	0,10	0,120	1,00	12,32	2,34E-06	0,12	1,33	0,09009	2,858608855	7,55E-05	6,80E-06
5669	1	17,00	20,00	0°	0,10	0,000	3,00	2,83	0,00E+00	-----	0,38	-----	3,957221144	1,05E-04	-----
	2	22,00	25,00	0°	0,10	0,000	3,00	3,65	0,00E+00	-----	0,47	-----	3,957221144	1,05E-04	-----
	3	30,00	33,00	0°	0,10	0,000	3,00	3,68	0,00E+00	-----	0,47	-----	3,957221144	1,05E-04	-----
5672	1	15,50	18,50	0°	0,10	0,020	3,00	4,21	2,75E-08	0,01	0,52	0,01280	3,957221144	1,05E-04	1,34E-06
	2	22,00	23,00	0°	0,10	0,010	1,00	4,13	7,33E-09	0,01	0,51	0,01949	2,858608855	7,55E-05	1,47E-06
	3	27,00	28,00	0°	0,10	0,000	1,00	3,70	0,00E+00	-----	0,47	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	4	31,00	32,00	0°	0,10	0,000	1,00	4,52	0,00E+00	-----	0,55	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	5	32,00	33,00	0°	0,10	0,020	1,00	3,68	2,40E-08	0,02	0,47	0,04274	2,858608855	7,55E-05	3,23E-06
	6	33,00	34,00	0°	0,10	0,020	1,00	3,68	2,40E-08	0,02	0,47	0,04274	2,858608855	7,55E-05	3,23E-06
	7	35,00	37,00	0°	0,10	0,060	2,00	4,45	2,29E-07	0,03	0,54	0,05505	3,551756036	9,38E-05	5,17E-06
5674	1	18,00	19,00	0°	0,10	0,000	1,00	12,60	0,00E+00	-----	1,36	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	3	31,00	33,00	0°	0,10	0,000	2,00	12,68	0,00E+00	-----	1,37	-----	3,551756036	9,38E-05	-----
5675	1	20,00	22,00	0°	0,10	0,200	2,00	7,31	3,62E-06	0,10	0,83	0,12034	3,551756036	9,38E-05	1,13E-05
	4	29,50	30,50	0°	0,10	0,600	1,00	7,56	2,96E-05	0,60	0,86	0,70096	2,858608855	7,55E-05	5,29E-05
5677	1	10,00	13,00	0°	0,10	0,000	3,00	1,60	0,00E+00	-----	0,26	-----	3,957221144	1,05E-04	-----
	2	20,00	22,00	0°	0,10	0,000	2,00	2,31	0,00E+00	-----	0,33	-----	3,551756036	9,38E-05	-----
5678	1	11,00	12,00	0°	0,10	0,000	1,00	4,85	0,00E+00	-----	0,59	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	2	12,00	15,00	0°	0,10	0,000	3,00	4,88	0,00E+00	-----	0,59	-----	3,957221144	1,05E-04	-----
5691	1	12,50	13,50	0°	0,10	0,070	1,00	6,93	4,77E-07	0,07	0,79	0,08827	2,858608855	7,55E-05	6,67E-06
	2	14,00	17,00	0°	0,10	0,000	3,00	7,73	0,00E+00	-----	0,87	-----	3,957221144	1,05E-04	-----
	3	18,20	19,20	0°	0,10	0,050	1,00	7,75	2,84E-07	0,05	0,87	0,05714	2,858608855	7,55E-05	4,32E-06
	4	21,50	22,50	0°	0,10	0,000	1,00	7,23	0,00E+00	-----	0,82	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	6	26,00	28,00	0°	0,10	0,010	2,00	6,95	1,23E-08	0,01	0,79	0,00629	3,551756036	9,38E-05	5,90E-07
	7	28,00	29,00	0°	0,10	0,000	1,00	7,72	0,00E+00	-----	0,87	-----	2,858608855	7,55E-05	-----
	8	31,50	32,50	0°	0,10	0,080	1,00	7,25	6,42E-07	0,08	0,82	0,09697	2,858608855	7,55E-05	7,32E-06
	9	37,50	38,50	0°	0,10	0,020	1,00	7,35	4,80E-08	0,02	0,83	0,02395	2,858608855	7,55E-05	1,81E-06

5716	1	46,00	47,00	0°	0,10	0,340	1,00	14,90	2,00E-05	0,34	1,59	0,21384	2,858608855	7,55E-05	1,61E-05
	2	40,00	41,00	0°	0,10	0,190	1,00	14,91	6,71E-06	0,19	1,59	0,11942	2,858608855	7,55E-05	9,02E-06
	3	50,50	51,50	0°	0,10	0,060	1,00	14,70	7,58E-07	0,06	1,57	0,03822	2,858608855	7,55E-05	2,89E-06
	4	57,00	58,00	0°	0,10	0,170	1,00	14,92	5,45E-06	0,17	1,59	0,10678	2,858608855	7,55E-05	8,06E-06
5718	1	30,00	31,00	10°	0,10	0,120	1,00	10,25	1,94E-06	0,12	1,12	0,10670	2,858608855	7,55E-05	8,06E-06
	2	33,00	34,00	10°	0,10	0,180	1,00	10,13	4,12E-06	0,18	1,11	0,16177	2,858608855	7,55E-05	1,22E-05
	3	38,00	39,00	10°	0,10	0,845	1,00	10,07	7,49E-05	0,85	1,11	0,76360	2,858608855	7,55E-05	5,77E-05
	4	43,00	46,00	10°	0,10	0,160	3,00	10,09	3,29E-06	0,05	1,11	0,04811	3,957221144	1,05E-04	5,03E-06
	5	49,00	50,00	10°	0,10	0,130	1,00	10,07	2,22E-06	0,13	1,11	0,11747	2,858608855	7,55E-05	8,87E-06
5745	4	23,00	24,00	0°	0,10	0,010	1,00	13,11	2,33E-08	0,01	1,41	0,00709	2,858608855	7,55E-05	5,35E-07
	5	37,00	38,00	0°	0,10	0,000	1,00	13,08	0,00E+00	-----	1,41	-----	2,858608855	7,55E-05	-----

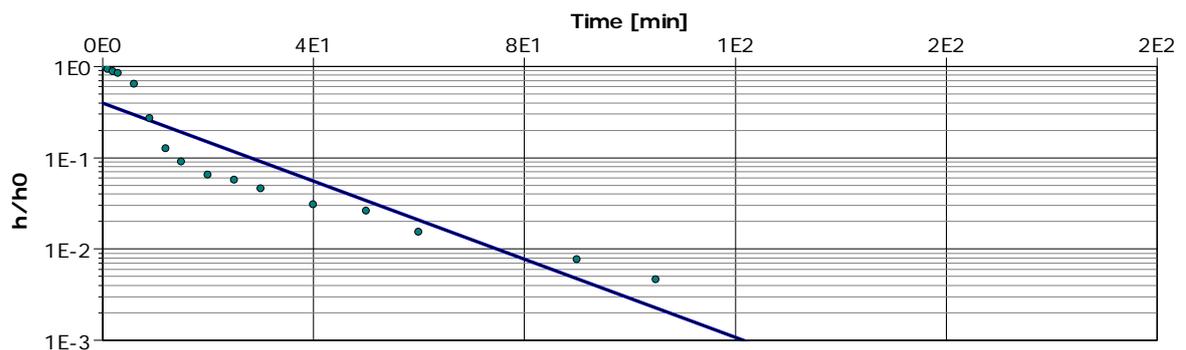
ANEXO 03 – RETAS DE CALIBRAÇÃO PARA ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO



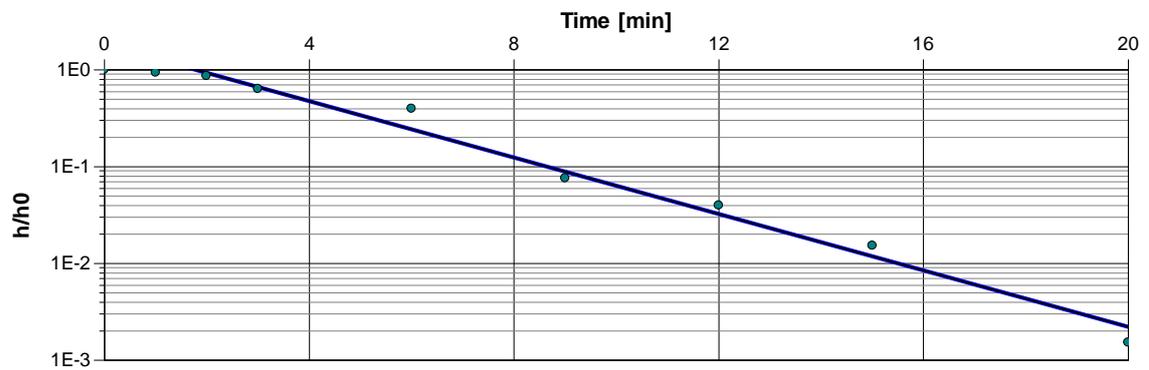




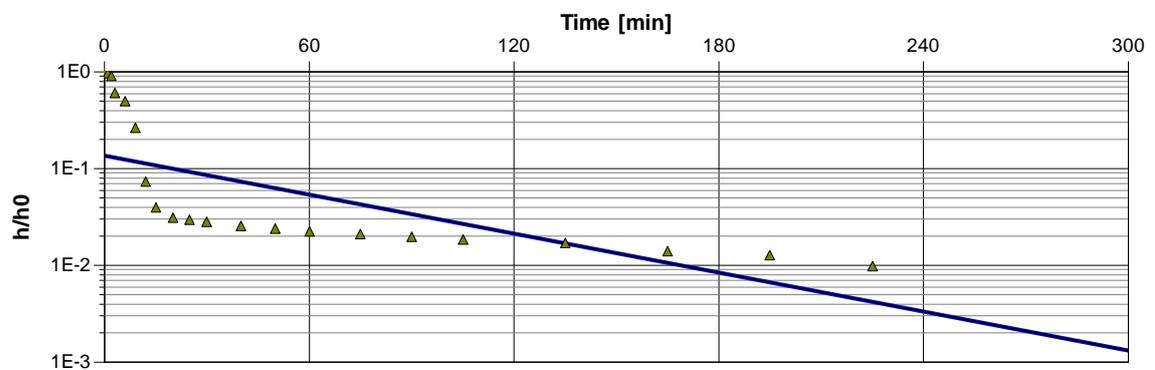
+ 5657B



• 5662A



• 5662B



▲ 5662C

