

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**GEOLOGIA ESTRUTURAL DE DETALHE PARA ELABORAÇÃO
DE MODELO CONCEITUAL DE CIRCULAÇÃO DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA: ESTUDO DE CASO EM JURUBATUBA, SP**

Bruna Fiume

Orientadora: Profa. Dra. Amélia João Fernandes

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO
2013

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e
Documentação do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

Fiume, Bruna

Geologia estrutural de detalhe para elaboração
de modelo conceitual de circulação de água
subterrânea: estudo de caso em Jurubatuba, SP /
Bruna Fiume. -- São Paulo, 2013.

p. 165: il. + anexos.

Dissertação (Mestrado): IGc/USP

Orient.: Fernandes, Amélia João

1. Aquífero Fraturado 2. Modelo conceitual 3.
Perfilagem geofísica I. Título

Dedico este trabalho à pessoa que tem sido mais presente em minha vida, meu porto-seguro e minha constante fonte de alegria, Marcelo.

AGRADECIMENTOS

Fazer o mestrado, para mim, não significou apenas a elaboração desta dissertação, mas sim, um projeto de vida, que vivi ao longo de quase três anos. Cada um desses anos foi regido por experiências bastante distintas, condicionadas pelas etapas as quais este mestrado se encaminhava. Como principais bagagens que levarei deste período, facilmente reconheço: o denso aprendizado, um sentimento de gratidão e a criação, ou o fortalecimento, de laços de amizade e de consideração a várias pessoas, que de alguma forma se fizeram presentes e estiveram comigo nesta jornada. Sendo assim, aqui segue a lista de meus sinceros agradecimentos.

Primeiramente, agradeço à minha orientadora, Profa. Amélia João Fernandes, pela atenção e dedicação, pelo seu esforço e interesse em ensinar e transmitir conhecimento, e também pela confiança e amizade que me foram concedidas. Com certeza, tudo isso facilitou o dia-a-dia do desenvolvimento deste trabalho.

Em seguida, agradeço aos coordenadores do projeto GESOL (ao qual este trabalho está vinculado), Profs. Reginaldo Bertolo e Ricardo Hirata, que também foram meus mentores na área de hidrogeologia desde a graduação, e cujo apoio sempre pude (e acredito que poderei) contar. Aproveitando, agradeço aos meus amigos e parceiros integrantes do GESOL, que não pouparam nenhum esforço para ajudar nas mais diversas necessidades, em prol de um bom desenvolvimento do projeto. São eles: Birelli, Vermelho (Paulo Lima), Habiba (Lucas Andreata), Marcos Barbosa, José Ângelo, Vítor e Veridiana. E também os colegas do CEPAS, Soninha, Fernando e Paulinho, sempre muito dispostos.

Agradeço à equipe do grupo G360 da Universidade de Guelph (Canadá), também parceiros neste projeto, pela oportunidade de estágio nesta reconhecida instituição, principalmente, na área de hidrogeologia e pela receptividade durante à minha estadia. Muito obrigada: Beth Parker, Ash, Suzanne, Andrey, Paul, Jonathan, Amanda, Celia, Maria, Pat e, especialmente, Carlos e Lia, que tornaram a minha estadia ainda mais agradável.

Meus profundos agradecimentos a todos que participaram nas atividades de campo, pois sozinha seria impossível: além dos integrantes do GESOL citados acima, não poderia faltar o Elthon, o Marcelo e toda a equipe de transporte do Instituto de Geociências da USP.

Agradeço também aos queridos amigos do LAMO, laboratório dos estudantes de hidrogeologia da USP, com quem tenho a maior afinidade: Ana Maciel, Tati, Alê, Sandra, Rafael, Paulo (PH), Bruno, Jonathan, Marcus, Ricardinho, Vitor, Ana Rios, Jorge e Guillaume (aqui se incluem mais uma vez todo o pessoal do GESOL). Falando em amigos, graças a Deus, há mais uma lista de pessoas queridas, que conheci devido à pós-graduação, a quem agradeço por ter compartilhado diversos momentos, principalmente, nos corredores do IGc: Cláudia, Nazaré, Tabatá, Alexandra, Patrícia, Eurídice, Jeane, Natali, Andrea, Soraia, Ângela, Carlos, Emanuel e Gustavo. Agradeço ainda, especialmente, à Nívea, minha grande parceira e amiga desde a graduação, e à Muriel, cuja amizade só fez crescer ao longo de uma convivência tão intensa, que se tem ao compartilhar o mesmo teto.

Agradeço a minha família, pela torcida e apoio incontestável, mesmo sem saber exatamente o que eu tanto estudo. E agradeço muito ao Marcelo, meu namorado, a quem recorri milhares de vezes na necessidade de um ombro amigo ou de uma ajuda experiente no fazer da geologia. Eu sei que esta dissertação não seria a mesma sem você.

Por fim, agradeço às instituições que viabilizaram a realização deste trabalho. São elas: Instituto de Geociências da USP e ao seu Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia; à CAPES e à FAPESP, pelas bolsas que me foram concedidas; e à FINEP e à FUSP, os órgãos de fomento que disponibilizaram os recursos necessários para os trabalhos acadêmicos.

RESUMO

Fiume, B. 2013. Geologia estrutural de detalhe para elaboração de modelo conceitual de circulação de água subterrânea: estudo de caso em Jurubatuba, SP. Dissertação (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 165 p.

Ao redor do canal de Jurubatuba, no município de São Paulo, a água subterrânea do Aquífero Cristalino apresentou elevadas concentrações de Compostos Orgânicos Voláteis (VOC), levando à proibição do seu uso nessa região. No Brasil, são raros os estudos sobre áreas intensamente contaminadas, principalmente, em meios heterogêneos como os aquíferos fraturados. Nesse contexto, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de elaborar um modelo conceitual da rede de fraturas, indicando os caminhos preferenciais da água subterrânea. Uma detalhada investigação da geologia estrutural foi realizada, a partir dos seguintes métodos: 1) análise de lineamentos traçados em escala local e regional; 2) levantamento de fraturas, segundo *scanlines* e pontos, em afloramentos; 3) aplicação conjunta de diferentes perfilagens geofísicas (cáliper, radiação gama, temperatura, condutividade elétrica, imageamento óptico e acústico - OTV e ATV - e *flowmeter*) em quatro poços profundos;. Os resultados estruturais obtidos, levaram à caracterização dos principais grupos de fraturas, quanto às suas direções, mergulhos, comprimentos e espaçamentos. Foi verificado que os principais grupos de fraturas identificados nos poços, podem ser correlacionados com os grupos identificados nos afloramentos. Foram eles: (1) NW a NNW, subvertical; (2) E-W a ENE, subvertical; (3) NE, subvertical; (4) E-W a WNW, com mergulho entre 30° e 60°; (5) NNE e NE, com mergulho entre 10° e 40°. As fraturas NW, bastante frequentes nos afloramentos, foram subamostradas nos poços, onde, por sua vez, predominam as fraturas NNW. Outra diferença foi observada com relação ao grupo NNE e NE de baixo ângulo de mergulho, que enquanto nos poços as fraturas estão muitas vezes associado à foliação, nos afloramentos esta associação não ocorre. Os espaçamentos obtidos nos afloramentos para os grupos subverticais e de médio ângulo são mais representativos do que aqueles obtidos através das perfilagens. No entanto, o oposto ocorre para o grupo de baixo ângulo. Os grupos foram ordenados em ordem decrescente de espaçamento da seguinte forma: NNE a NE/ baixo ângulo, E-W a ENE/vertical, NW a NNW/vertical, E-W a WNW/médio e NE/vertical. Os grupos também foram classificados de acordo com a sua importância para o fluxo, sendo que: o grupo E-W a WNW e mergulho médio, apresentou menor importância; os três grupos subverticais (E-W a ENE, NE e NW a NNW) apresentaram importância intermediária, não sendo possível identificar a hierarquia entre eles; e o grupo de direção NNE a NE e baixo ou médio ângulo, com a maior importância. As de baixo ângulo são compatíveis com um dos campos de esforços atuais proposto pela literatura, tendo σ_1 de direção NE em regime compressivo, ou seja, com σ_3 vertical.

Palavras-Chave: aquífero fraturado, modelo conceitual, perfilagem geofísica

ABSTRACT

Fiume, B. 2013. Detailed structural geology aiming at the elaboration of a conceptual model of underground water flow circulation: a case study in Jurubatuba, SP. Dissertação (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 165 p.

In the surroundings of the Jurubatuba channel, São Paulo, the underground water of the Crystalline Aquifer has elevated concentrations of Volatile Organic Compounds (VOC), which led to its prohibition to usage. In Brazil, the studies about highly contaminated areas are scarce, and especially in heterogeneous environments like the fractured aquifers. Therefore, in this context, this work's main purpose is to elaborate a conceptual model of the fracture net in the Crystalline Aquifer, indicating the preferential ways of underground water flow and, consequently, of its contaminants. A detailed investigation of the structural geology of the area was conducted, using the following methods: 1) analysis of lineaments in local and regional scale; 2) measurements of fractures in outcrops utilizing *scanlines* and observation points; 3) integrated geophysical logging (calipers, gamma radiation, temperature, electrical conductivity, optical and acoustic imaging – OTV and ATV – and flowmeter) in four deep wells. The results obtained led to the characterization of strike, dip, length and spacing of all fractures and its subsequent division in groups. The main fracture groups identified in the wells can be correlated to the ones observed in the outcrops. The groups are: (1) NW to NNW, subvertical; (2) E-W to ENE, subvertical; (3) NE, subvertical; (4) E-W to WNW, with dips between 30° and 60°; (5) NNE and NE, with dips between 10° and 40°. The fractures with direction NW, which are very common in outcrops, were subsampled in the wells - dominated by fractures NNW. Another difference observed was related to the low dip NNE and NE fractures; in the wells it is clear that they are associated with the rock foliation, but they don't occur in outcrops. The spacing obtained for the subvertical and medium angle groups in outcrops are more representative than the ones obtained through logging. However, the opposite is observed for the low angle group. The groups were then ordered following the spacing criteria. They are, in a decrescent order: NNE to NE/low angle, E-W to ENE/vertical, NW to NNW/vertical, E-W to WNW/medium angle and NE/vertical. The groups were also classified according to its importance of flow path, being: group E-W to WNW/medium dip was the least importance; the three subvertical groups had intermediate importance – not being possible to hierarchize between them; the most important group is NNE to NE and low to medium dip angle. This result is in agreement with one of the stress fields proposed in the literature, σ_1 with NE direction and in a compressive regimen, where the fractures that favor the flow are of low angle.

Keywords: fractured aquifer, conceptual model, geophysical logging

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Localização da área e dos poços em estudo (com número), e distribuição das concentrações de Compostos Orgânicos Voláteis (VOC) em poços cadastrados pelo DAEE ...</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2 - Modos I, II e III de propagação de fraturas (adaptado de Lawn & Wilshaw, 1975)</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3 - Diagrama círculo de Mohr indicando as condições de formação de fraturas extensionais, híbridas e de cisalhamento (adaptado de Price & Cosgrove, 1990).....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 4 - Posicionamento das fraturas extensionais (linha tracejada) e das fraturas de cisalhamento (linha contínua e com movimento indicado por seta) segundo o regime tectônico extensional (i), compressivo (ii) e transcorrente (iii)</i>	<i>19</i>
<i>Figura 5 - Mapa geológico da Bacia de São Paulo e porção sudoeste da Bacia de Taubaté (retirado de Riccomini et al., 2004)</i>	<i>27</i>
<i>Figura 6 - Mapa geológico dos Terrenos Embu e Apiaí-Guaxupé (modificado de Heilbron et al., 2004).....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 7 - Principais falhamentos do Estado de São Paulo (retirado de Hasui et al., 1981)....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 8 - Mapa com a distribuição da direção do SHmax, intraplaca, para a Placa Sul-Americana (modificado de Assumpção et al., 2011).....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 9 - Localização das pedreiras visitadas e dos poços da área de estudo.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 10 - Esquema da amostragem através do método de scanline; são amostradas apenas as fraturas que cruzam a scaline (modificado de Pino, 2012).....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 11 - Localização dos poços em que foram realizadas as perfilagens geofísicas deste trabalho (255, 256, 1204 e 1346) e dos poços em que foram disponibilizados os dados de perfilagens acústicas realizadas no Projeto Jurubatuba (691, 692, 1249, 1501, 1502 e 1503)</i>	<i>42</i>
<i>Figura 12 - Arranjo dos equipamentos utilizados para a execução das perfilagens (adaptado de Hubbard et al., 2008).....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 13 - Equipamentos utilizados nas perfilagens geofísicas</i>	<i>45</i>
<i>Figura 14 - Perfil da variação da temperatura e condutividade elétrica da água em função da profundidade (a) presença de fluxo; (b) ausência de fluxo (retirado de Wahnfried, 2010).....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 15 - (a) demonstração da intersecção de uma fratura com um poço, projetada em um plano, o que resulta numa senóide; a partir desta, determina-se o sentido do mergulho (ϑ), na porção superior, e o seu ângulo, baseado na extensão de b (adaptado de Paillet, 1994); (b) trecho de imagem óptica, com a parede do poço alaranjada e uma fratura interceptada</i>	<i>48</i>
<i>Figura 16 - Perfis de calíper mecânico, acústico e imagens do tempo de trânsito e da amplitude de ondas refletidas obtidas através do imageamento acústico (adaptado de Williams & Johnson, 2004)</i>	<i>49</i>
<i>Figura 17 - Reprodução do gráfico apresentado pelo software de aquisição de dados obtidos com o Heat Pulse Flowmeter (o eixo x indica o tempo transcorrido em segundos e o eixo y indica o diferencial de temperatura em contagens por segundo - CPS)</i>	<i>51</i>

<i>Figura 18 - Ilustração da relação angular entre o espaçamento aparente (d') e o espaçamento verdadeiro (d) de fraturas de um mesmo grupo, e os cálculos envolvidos na correção da densidade de fraturas (modificado de Terzaghi, 1965)</i>	<i>54</i>
<i>Figura 19 - Mapa geológico com a localização das pedreiras visitadas e dos poços da área de estudo (adaptado de Coutinho, 1980).....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 20 - (a) gnaisse da pedreira GS-1, exibindo estiramento mineral restrito à face a esquerda da foto; (b) detalhe do granito foliado da pedreira GS-2, com veio de quartzo à direita da foto.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 21 - Polos das medidas de foliação das pedreiras GS-1 e GS-2.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 22 - Granito maciço, cinza claro, equigranular da pedreira GS-3</i>	<i>67</i>
<i>Figura 23 - Mapa geológico da área de estudo (adaptado de FUSP, 2002).....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 24 - Imagens OTV onde se observa: (a) poço 256, rocha de estrutura maciça, com lentes de minerais félsicos e granulação média e lentes mais escuras com granulação fina; (b) poço 256, rocha foliada, de granulação fina e rica em minerais máficos; (c) poço 1204, bandamento com porções máficas de granulação fina e porções félsicas de granulação fina a média; (d) trecho com camada xistosa, de cor mais escura e espessura cm a dcm; os números em vermelho marcam as profundidades.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 25 - Mapa com a profundidade do topo do embasamento e localização das seções geológicas.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 26 - Seções geológicas (1- ENE; 2- NE; 3- NW) com exagero vertical de 5x, realizadas a partir de dados de poços profundos (modificado de São Paulo, 2009).....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 27 - Mapa de lineamentos, traçados em escala regional, somente para a área do Terreno Embu</i>	<i>72</i>
<i>Figura 28 - MDT (a esquerda) e mapa hipsométrico (a direita) com o traçado de lineamentos em escala local</i>	<i>73</i>
<i>Figura 29 - (a) histogramas da frequência da direção de lineamentos traçados em escala regional e local; (b) histogramas da frequência do comprimento de lineamentos traçados nas referidas escalas</i>	<i>74</i>
<i>Figura 30 - Diagramas de rosáceas com o comprimento total de lineamentos de acordo com a sua orientação, para as escalas (a) regional e (b) local</i>	<i>75</i>
<i>Figura 31 - Planta das pedreiras GS-1 e GS-2 com a localização das scanlines e dos pontos de observação.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 32 - Planta das pedreiras GS-3 e GS-4 com a localização das scanlines e dos pontos de observação.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 33 - Estereogramas com os dados de fraturas obtidos através de scanlines, com os contornos de densidade corrigidos com relação ao viés de orientação e os grupos de fraturas identificados, separados por afloramento.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 34 - Estereogramas com os dados de fraturas obtidos através dos pontos de observação, com os contornos de densidade e os grupos de fraturas identificados, separados por afloramento.....</i>	<i>80</i>

<i>Figura 35 - Estereogramas com círculos máximos das fraturas que pertencem aos grupos de fraturas identificados em cada afloramento (dados amostrados em scanlines e em pontos de observação)</i>	<i>81</i>
<i>Figura 36 - (a) GS-1, SL-4: zona de fraturas NW com espaçamento dm e superfície ocre (atitude média 220/85); (b) GS-4, SL-5: fratura NNW contínua com superfície ocre (atitude 83/84); (c) GS-1, SL-4: detalhe da fratura em (a) mostrando feição de pluma; (d) GS-4, SL-4: fratura NNW com alteração ocre e feição de pluma (atitude 86/82).....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 37 - GS-3, ponto U: zona de fratura do grupo NW (atitude média 58/90); notar os traços retilíneos e a grande continuidade (ocorre continuamente nas quatro bancadas visíveis neste local da pedreira).....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 38 - GS-3, ponto X: ao centro tem-se uma zona de fraturas NW verticais (atitude média 57/88), muito contínuas, parcialmente, acompanhada por vegetação, onde foi observado um dique máfico cm; na porção direita, grande parte das fraturas desta zona terminam em fratura E-W de médio ângulo, a qual, na sua porção superior, passa a ser subvertical e mantém a direção E-W.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 39 - (a) GS-3, SL-3: fraturas de direção E-W e mergulho ora para norte, ora para sul, formando pares conjugados (atitudes médias 2/75 e 185/60) que indicam regime de esforços normal; (b) GS-3, ponto W: zonas de fraturas de direção E-W e mergulho para sul (atitude média 185/70)</i>	<i>85</i>
<i>Figura 40 - (a) GS-3, SL-4: zona de fratura do grupo E-W subvertical (atitude média 180/86) junto com fratura E-W de ângulo médio (196/55); (b) GS-4, SL-1: zona de fratura do grupo E-W a ENE subvertical (atitude média 340/80)</i>	<i>86</i>
<i>Figura 41 - (a) GS-1, vista da SL-11 (bancada inferior) e dos pontos O e O₃ (bancadas do meio e superior, respectivamente): as fraturas com forte alteração nos pontos O e O₃ são NE (308/86 e 306/78, respectivamente) e, na SL-11, trata-se de uma zona de fraturas NW (atitude média 60/85); (b) GS-1, ponto J: fratura NE (310/70) com coloração ocre e rocha alterada ao longo de seu prolongamento</i>	<i>87</i>
<i>Figura 42 - GS-1, próximo à SL6: fraturas de sub-horizontais bastante contínuas, que alcançam dezenas de metros de comprimento, suavemente onduladas</i>	<i>89</i>
<i>Figura 43 - GS-1, ponto B: observam-se fraturas de sub-horizontais com alteração evidente (cor ocre) na porção central da foto, e fraturas NW quase ortogonais à parede, terminando nas fraturas sub-horizontais; acima e abaixo da faixa com fraturas sub-horizontais de cor ocre, a rocha apresenta-se menos alterada.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 44 - (a) GS-2, vista de duas bancadas de direção NNE: fraturas de direção N-S com mergulho de ângulo médio para oeste, paralelas a veios félsicos e contínuas; (b) GS-2, SL-3: detalhe da bancada superior de (a), onde há duas fraturas com atitude média 280/65.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 45 - (a) GS-2, vista da SL-4: fratura contínua, de direção N-S com mergulho de ângulo médio para leste; (b) GS-2, SL-5: zona de fratura com espaçamento cm a dm, padrão anastomosado e discordantes dos veios (atitude média 100/42).....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 46 - Frequência acumulada dos valores de densidade (número de fraturas/metro) mostrando em (a) bom ajuste com distribuição logarítmica para os diversos grupos de fraturas em conjunto (valores de 25%, 50% e 75% de 0,07, 0,11 e 0,21, respectivamente) e</i>	

<i>em (b) melhor ajuste com distribuição linear (média = 0,5) para as fraturas de baixo ângulo da GS-1.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 47 - Estereogramas com a representação de planos de falhas com suas respectivas estrias observadas, em cada um dos afloramentos</i>	<i>95</i>
<i>Figura 48 - GS4, ponto D: (a) fraturas 183/32 e 176/32 com estrias no rumo do mergulho, sendo conectadas por rampa (junto ao martelo); (b) detalhe da rampa com estrias oblíquas ao deslocamento inverso, que caracteriza a fratura de um modo geral</i>	<i>97</i>
<i>Figura 49 - Pedreira GS-2, SL2: fratura N-S com mergulho médio para oeste (atitude 282/65) com estrias (caimento de 27 para N2E); os degraus no preenchimento de quartzo indicam movimento sinistral</i>	<i>99</i>
<i>Figura 50 - GS-1, próximo ao ponto B: fraturas de direção NW subverticais terminam nas fraturas de baixo ângulo da GS-1, indicando que as fraturas NW são mais jovens (notar alteração ocre das fraturas NW, e fratura NE de alto ângulo, no canto esquerdo da foto, quase sem alteração)</i>	<i>102</i>
<i>Figura 51 - (a) GS-3, vista da SL-4: fratura ENE (204/35) do evento $C-\sigma_1$ N-S, gerador de falhas inversas, termina em fratura NNW (74/83) do evento $T-\sigma_1$ NW; (b) GS-4, SL-3: fratura de direção NNE e mergulho baixo (284/28) do evento $C-\sigma_1$ WNW termina em fratura E-W de mergulho elevado (3/78) do evento $E-\sigma_3$ N-S; ambos os casos indicam que as fraturas de mergulho baixo são mais jovens</i>	<i>103</i>
<i>Figura 52 - Legenda da litologia e dos tadpoles das figuras 53 a 56</i>	<i>106</i>
<i>Figura 53 - Perfis de litologia, cáliper mecânico (vermelho) e acústico (preto), T e CE, vazão e tadpoles, com as classificações de transmissividade, espessura aparente e relação com a foliação, para o poço 255; o revestimento vai até a profundidade de aproximadamente 28 m</i>	<i>107</i>
<i>Figura 54 - Perfis de litologia, cáliper mecânico e acústico, T e CE, vazão e tadpoles, com as classificações de transmissividade, espessura aparente e relação com a foliação, para o poço 256; o revestimento vai até a profundidade de aproximadamente 67 m.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 55 - Perfis de litologia, cáliper mecânico e acústico, T e CE, vazão e tadpoles, com as classificações de transmissividade, espessura aparente e relação com a foliação, para o poço 1204; o revestimento vai até a profundidade de aproximadamente 51 m</i>	<i>109</i>
<i>Figura 56 - Perfis de litologia, cáliper mecânico e acústico, T e CE, vazão e tadpoles, com as classificações de transmissividade, espessura aparente e relação com a foliação, para o poço 1346; o revestimento vai até a profundidade de 61 m</i>	<i>110</i>
<i>Figura 57 - Histogramas de fraturas X profundidade, realizados separadamente para cada poço</i>	<i>113</i>
<i>Figura 58 - Estereogramas de contorno de densidades, para cada poço, com a identificação de fraturas paralelas à foliação e dos principais grupos de fraturas.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 59 - Análise das fraturas paralelas à foliação, através de estereogramas (polo de fraturas) e histogramas de direção e mergulho, separados de acordo com o projeto vigente na sua coleta.....</i>	<i>116</i>

<i>Figura 60 - Estereogramas de contorno de densidades e de polo de fraturas, com os grupos identificados pelo método ISIS (grupo 1 em azul e grupo 2 em vermelho) para as fraturas coletadas através do (a) projeto Gesol, (b) projeto Jurubatuba e (c) ambos os projetos.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 61 - Gráfico de frequência acumulada (% nas ordenadas) mostra distribuição logarítmica para a densidade (abcissas).....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 62 - Trechos de perfilagens em que ocorrem fraturas importantes para o fluxo (a) perfilagens cáliber, OPTV e ATV para o intervalo entre 148,0 e 166,0 m do poço 255; (b) perfilagens cáliber e ATV (não foi feito OPTV neste trecho) para o intervalo entre 136,5 e 155,0 m do poço 256.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 63 - Trechos de perfilagens em que ocorrem fraturas importantes para o fluxo (a) perfilagens cáliber, OPTV e ATV para os intervalos entre 202,0 e 208,0 m e 248,0 e 255,8 m do poço 1204; (b) perfilagens cáliber, OPTV e ATV para os intervalos entre 61,0 e 70,5 m e 168,0 e 172,0 do poço 1346.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 64 - Estereogramas com polos de fraturas classificados de acordo com a intensidade de vazão (todos os dados juntos e também separados por poço).....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 65 - Modelo conceitual de circulação de água subterrânea com representação da rede de fraturas e da importância relativa dos grupos de fraturas em relação ao fluxo; para cada grupo de fraturas foi representado o menor e o maior espaçamento, de modo que as fraturas podem ocorrer com qualquer espaçamento entre estes apresentados.....</i>	<i>135</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Eventos tectônicos mesozoicos-cenozoicos determinados por diferentes autores (adaptado de Fernandes & Mello, 2004).....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 2 - Coordenadas UTM, cota topográfica e dados de produção dos poços em estudo. GS = Projeto GESOL, JB = Projeto Jurubatuba.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 3 - Quantificação das fraturas de cada grupo observadas por scanline e definição dos grupos para os quais foram calculados o espaçamento e a densidade de fraturas; em vermelho estão os grupos que não foram considerados por apresentarem α menor que 20° 58</i>	
<i>Tabela 4 - Modelo da tabela utilizada na conversão dos valores de velocidade, obtidos pelo flowmeter, em vazão e no cálculo de diferença de vazão entre dois pontos de medidas consecutivos.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 5 - Exemplo da classificação das fraturas em relação à vazão, para um intervalo entre duas medidas com o flowmeter no poço 256, utilizando a classificação de espessura aparente no auxílio determinação das fraturas mais transmissivas</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 6 - Valores de densidade e de espaçamento de cada grupo de fraturas, separadamente, por scanline (onde haviam, no mínimo, duas fraturas do grupo em questão) obtidos através dos métodos de Terzaghi (1965) e de Kiraly (1970)</i>	<i>91</i>
<i>Tabela 7 - Intervalo dos valores de densidade e de espaçamento (mínimo e máximo) para cada grupo de fraturas, por afloramento, de acordo com o método utilizado (Terzaghi, 1965 e Kiraly, 1970).....</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 8 - Grupos com zonas de fraturas, observadas em scanlines, e o respectivo número de fraturas que constituem a zona, espessura e espaçamento (corrigidos pelo método de Kiraly e não corrigidos).....</i>	<i>94</i>
<i>Tabela 9 - Síntese dos principais grupos de fraturas identificados em afloramentos e suas características quanto ao espaçamento, feições indicativas de fluxo, modo de propagação, regime de esforços e orientação dos esforços principais</i>	<i>101</i>
<i>Tabela 10 - Ordem cronológica (do antigo mais para o mais jovem) dos principais eventos tectônicos identificados por meio da análise dos grupos de fraturas encontrados nos afloramentos</i>	<i>103</i>
<i>Tabela 11 - Principais aspectos construtivos dos poços, com base no arquivo do DAEE e também pelo calíper mecânico para os poços 255, 256, 1204 e 1346</i>	<i>106</i>
<i>Tabela 12 - Valores de densidade e de espaçamento de cada grupo de fraturas obtidos, separadamente, para cada poço, através dos métodos de Terzaghi (1965) e de Kiraly (1970); estão destacados em vermelho os grupos cujo α é menor que 20°</i>	<i>120</i>
<i>Tabela 13 - Mediana e quartis da densidade e do espaçamento do principal grupo de fraturas identificado através dos dados de perfilagens de poços.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabela 14 - Valores de espaçamento de fraturas (em metros) para os grupos comuns aos afloramentos e aos poços (* pedreira em que o grupo aparece de forma mais marcante)..</i>	<i>130</i>

SUMÁRIO

Agradecimentos	2
Resumo	4
Abstract	5
Lista de Figuras	6
Lista de Tabelas	11
Sumário	12
1. Introdução	14
1.1 Objetivos	15
1.2 Localização da Área de Estudo	15
2. Revisão de Trabalhos Anteriores	17
2.1 Gênese de Fraturas e Seus Padrões	17
2.2 Fluxo de Água Subterrânea em Meios Fraturados e Modelos Conceituais	20
2.3 Aplicação de Perfilagens Geofísicas e Geologia Estrutural em Estudos de Aquíferos Fraturados	24
2.4 Geologia Regional e Hidrogeologia	26
2.4.1 A Bacia de São Paulo e Seu Embasamento Pré-Cambriano	26
2.4.2 Estruturas Rúpteis e Neotectônica	30
2.4.3 Hidrogeologia	34
3. Materiais e Métodos	36
3.1 Elaboração de Seções Geológicas	36
3.2 Análise de Lineamentos	36
3.3 Levantamentos Estruturais em Afloramentos	38
3.4 Perfilagens Geofísicas em Poços Profundos	41
3.4.1 Perfilagem de temperatura (T) e condutividade elétrica (CE) da água	46
3.4.2 Perfilagem cáliper e de radiação gama natural	47
3.4.3 Imageamento óptico (OTV) e acústico (ATV)	47
3.4.4 Perfilagem de fluxo de água (flowmeter)	50
3.5 Processamento de Dados Estruturais	52
3.5.1 Correção de Viés de Orientação	52
3.5.2 Caracterização dos Principais Grupos de Fraturas e Análise Tectônica	59
3.6 Processamento de Dados de Fluxo	61
3.7 Modelo Conceitual de Circulação de Água Subterrânea	63
4. Resultados	65
4.1 Geologia da Área de Estudo	65
4.2 Análise de Lineamentos	71

4.3 Dados de Afloramentos	76
4.3.1 Caracterização dos Principais Grupos de Fraturas.....	76
4.3.2 Análise tectônica	94
4.3.3 Comparação dos eventos tectônicos com os descrito na literatura	103
4.4 Dados de Perfilagens Geofísicas	104
4.4.1 Comparação dos Resultados Obtidos pelas Diversas Técnicas de Perfilagem	104
4.4.2 Análise dos dados de fraturas.....	112
4.4.3 Análise de Fluxo	122
4.5 Comparação dos Resultados e Elaboração do Modelo Conceitual.....	128
5. Conclusões.....	136
6. Referências Bibliográficas	139
ANEXO 1.....	148
ANEXO 2.....	151
ANEXO 3.....	162

1. INTRODUÇÃO

Na zona industrializada ao redor do canal Jurubatuba, a água de poços tubulares profundos tem apresentado elevadas concentrações de solventes organoclorados, representando um risco à saúde da população local. Devido a este panorama, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) e a Coordenação de Vigilância em Saúde (COVISA) intensificaram as investigações ambientais, e incluíram a região de Jurubatuba em uma das seis zonas de restrição do uso da água subterrânea no Estado de São Paulo (L'Apicciarella, 2009).

Atualmente, apesar dos casos de contaminação estarem crescendo cada vez mais com o avanço industrial, são raros os estudos sobre a caracterização de áreas intensamente contaminadas, principalmente em meios complexos e heterogêneos como os aquíferos fraturados.

No Brasil, as pesquisas em aquíferos fraturados, de um modo geral, tem se restringido a estudos que investigam a produção de poços nesses meios, baseando-se na confrontação entre os dados de vazão e capacidade específica com diversos fatores morfológicos e geológicos (Fernandes, 2008). Investigação de detalhe em aquífero fraturado (Aquífero Serra Geral), que empregou desde métodos geológicos de detalhe, perfilagens em poços, uso de obturadores para testes hidráulicos e coletas de águas, e análises químicas e isotópicas (Fernandes *et al.*, 2010, Wahnfried, 2010), foi realizada de forma pioneira no país. Como exemplo de pesquisa de detalhe em aquífero cristalino de rochas pré-cambrianas pode-se citar Alves (2008). A caracterização de áreas contaminadas requer o emprego de tecnologias diversificadas, que serão empregadas no projeto denominado GESOL (bases técnicas para a gestão de áreas contaminadas por solventes clorados em aquíferos fraturados), no qual a presente proposta de mestrado está inserida.

O projeto GESOL constitui uma parceria entre universidades (USP, UNESP, University of Guelph e University of Waterloo), órgãos públicos (CETESB e Instituto Geológico) e possui financiamento FINEP. Entre os pesquisadores envolvidos estão os Profs. Dr. Reginaldo Bertolo (coordenador) e Dr. Ricardo Hirata da USP, Dra. Amélia João Fernandes do IG-SMA, além dos renomados professores John Cherry e Beth Parker, ambos da Universidade de Guelph, e Ramon Aravena da Universidade de Waterloo, que possuem ampla liderança, experiência e conhecimento na área da hidrogeologia e hidrogeoquímica.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi elaborar um modelo conceitual da rede de fraturas, indicando, de forma preliminar, os caminhos de fluxo em uma dada ordem de importância. Os objetivos específicos foram:

- Caracterização dos principais grupos de fraturas, suas direções, mergulhos, comprimentos e espaçamentos;
- Analisar dados de perfilagens de poços para identificar as fraturas mais transmissivas;
- Identificar os eventos tectônicos que atuaram na região de estudo com o objetivo de compará-los com os eventos tectônicos mais recentes, descritos na literatura, e verificar se os grupos de fraturas hidráulicamente mais ativos são controlados pela atividade neotectônica e/ou pelo campo de esforços atual, deduzido a partir de dados sísmicos e de breakouts, presentes na literatura.

Apesar da advecção acontecer preferencialmente ao longo das fraturas com maior abertura hidráulica, é fundamental que a rede de fraturas seja caracterizada como um todo, pois o transporte de contaminantes organoclorados também ocorre ao longo de fraturas pouco transmissivas, nas quais tendem a ficar mais concentrados. Com o cumprimento de tais objetivos, o modelo conceitual elaborado fornecerá dados importantes para o planejamento de testes hidráulicos e amostragens do projeto GESOL, resultando em economia de tempo e de recursos para a realização de pesquisas sobre o comportamento dos contaminantes e para a sua remediação.

1.2 Localização da Área de Estudo

A área de estudo se situa nas proximidades do canal Jurubatuba, no centro-sul da cidade de São Paulo, numa área de intensa atividade industrial (figura 1). O local pode ser acessado diretamente pela Av. das Nações Unidas (Marginal Pinheiros), a qual apresenta fácil acesso às rodovias estaduais por estar conectada à Marginal Tietê.

Na figura 1 (mapa de localização dos poços da área de estudo), pode-se observar que diversos poços apresentam concentrações acima do limite de potabilidade para os Compostos Orgânicos Voláteis (VOC).

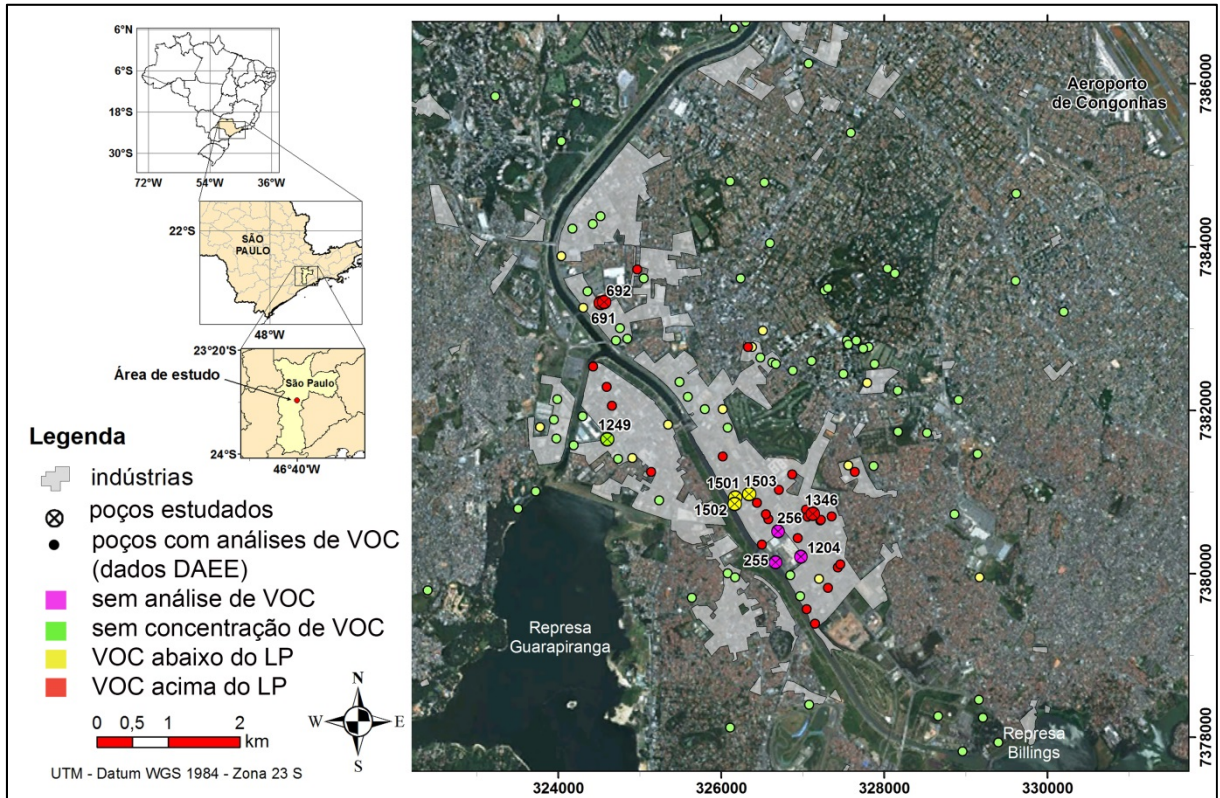


Figura 1 - Localização da área e dos poços em estudo (com número), e distribuição das concentrações de Compostos Orgânicos Voláteis (VOC) em poços cadastrados pelo DAEE

2. REVISÃO DE TRABALHOS ANTERIORES

Nos aquíferos de baixa porosidade primária, geralmente, constituídos por rochas ígneas e metamórficas, o fluxo de água subterrânea é condicionado por suas fraturas; por isso, são denominados aquíferos fraturados. Existe um objetivo comum na maioria dos estudos em aquíferos fraturados, principalmente, entre aqueles que lidam com áreas potencialmente contaminadas, o qual consiste na determinação dos caminhos preferenciais da água subterrânea e de seus contaminantes.

Segundo Domenico & Schwartz (1990), nesse tipo de aquífero, três parâmetros geométricos das fraturas são responsáveis pela configuração do fluxo: abertura, densidade e conectividade. Uma vez que a determinação de tais parâmetros é grandemente dificultada pela inerente descontinuidade das propriedades geométricas da rede de fraturas, o entendimento deste fluxo torna-se uma tarefa bastante complexa.

Sendo assim, perfilagens geofísicas, capazes de fornecer informações a respeito da permeabilidade de fraturas que interceptam os poços perfilados e sobre a distribuição do sistema de fraturas, e estudos estruturais, voltados para o reconhecimento de padrões de fraturas e do modo de propagação dos principais grupos de fraturas, bem como da sua ordenação cronológica, são ferramentas que contribuem para a elaboração de modelos conceituais da rede de fraturas. Estes, quanto mais fiéis à realidade, mais contribuirão para uma previsão dos caminhos preferenciais de fluxo, auxiliando tanto os estudos aplicados à contaminação quanto aqueles com ênfase em planejamento e gestão de uso da água subterrânea.

2.1 Gênese de Fraturas e Seus Padrões

As fraturas correspondem a superfícies planares ou onduladas, ao longo das quais a rocha perde parte de sua coesão e continuidade. São geradas por deformação rúptil e, por isso, se formam em níveis crustais rasos.

Existem três mecanismos de propagação das fraturas (figura 2): extensional, com esforços de tração perpendiculares à superfície da fratura (modo I); cisalhamento, com deslizamento paralelo à frente de propagação (modo II); ou cisalhamento com deslizamento perpendicular à frente de propagação (modo III). Os diversos modos de propagação geram diferentes tipos de fraturas (figura 3): fraturas

extensionais, através do modo I; fraturas de cisalhamento, a partir dos modos II e III; e fraturas híbridas, que se propagam em situações intermediárias, tanto pela atuação do modo I como pelos modos II e III.

A magnitude dos esforços principais efetivos, máximo e mínimo (σ_1 e σ_3), que atuam na superfície terrestre, é responsável pelo modo de propagação das fraturas. As condições para a geração dos diferentes tipos de fraturas, de acordo com os esforços máximo e mínimo, podem ser representados graficamente pelo círculo de Mohr-Coulomb (figura 3).

As fraturas ainda apresentam relações angulares definidas com os esforços principais, conforme pode ser observado na figura 3. As fraturas extensionais são paralelas ao σ_1 e perpendiculares ao σ_3 ; enquanto as fraturas híbridas e de cisalhamento formam um ângulo agudo com σ_1 , denominado de θ , e obtuso com σ_3 .

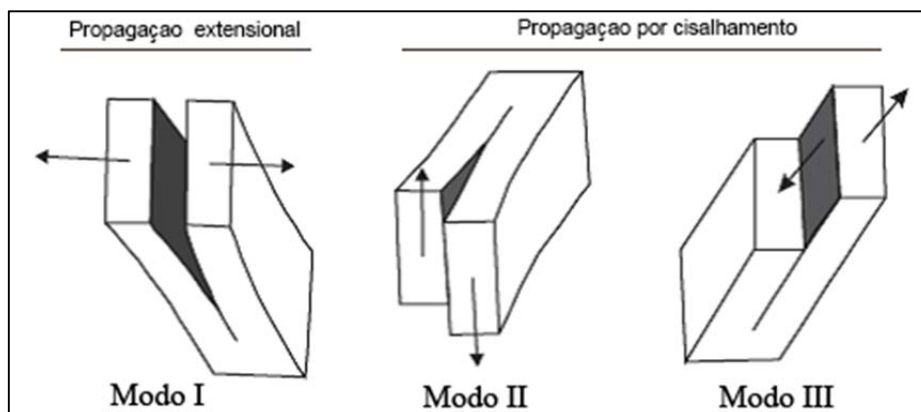


Figura 2 - Modos I, II e III de propagação de fraturas (adaptado de Lawn & Wilshaw, 1975)

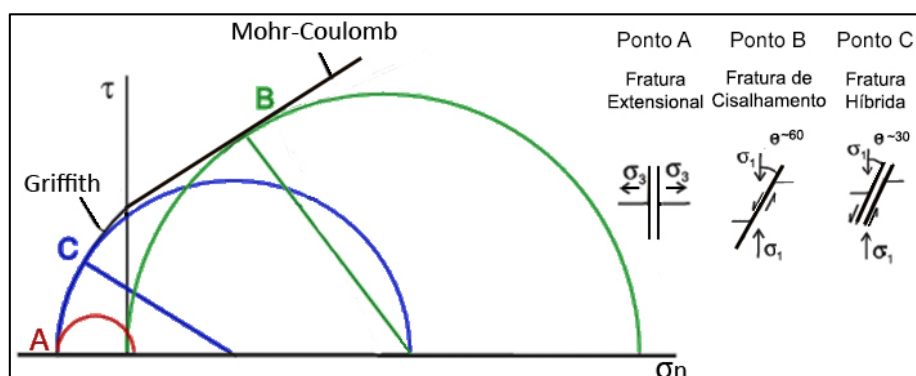


Figura 3 - Diagrama círculo de Mohr indicando as condições de formação de fraturas extensionais, híbridas e de cisalhamento (adaptado de Price & Cosgrove, 1990)

Segundo Lawn & Wilshaw (1975), os modos de propagação determinam a abertura das fraturas, por isso, saber distinguí-los pode ser importante para o estudo de hidrogeologia em aquíferos fraturados.

Em campo é possível observar feições que são diagnósticas do modo de propagação das fraturas. Por exemplo, nas fraturas extensionais, comumente são encontradas feições plumosas (*plume*) e do tipo “costela” (*rib*); enquanto as fraturas de cisalhamento podem apresentar estrias acompanhadas, por vezes, de indicadores cinemáticos. As fraturas híbridas e de cisalhamento, podem ocorrer sob a forma de pares conjugados e, para distinguí-las, utiliza-se o ângulo entre os pares (2θ), que é em torno de 60° para as fraturas de cisalhamento e entre 10° - 50° para as híbridas (Hancock, 1985). Já, as fraturas extensionais ocorrem desde com uma única orientação bem definida, paralelas umas às outras, até com orientações totalmente aleatórias (Cosgrove, 1998), dependendo da magnitude relativa entre os esforços.

Como mostrado acima, a geração de fraturas de cisalhamento e extensionais tem relação com a magnitude absoluta e com o esforço diferencial ($\sigma_1 - \sigma_3$). No entanto, a orientação espacial de tais estruturas depende da orientação dos esforços principais (σ_1 , σ_2 e σ_3) no espaço. Esta orientação dá origem a três regimes tectônicos que geram os três tipos básicos de falhas ou de fraturas de cisalhamento, segundo a classificação de Anderson (1951): falhas normais, inversas ou transcorrentes (figura 4).

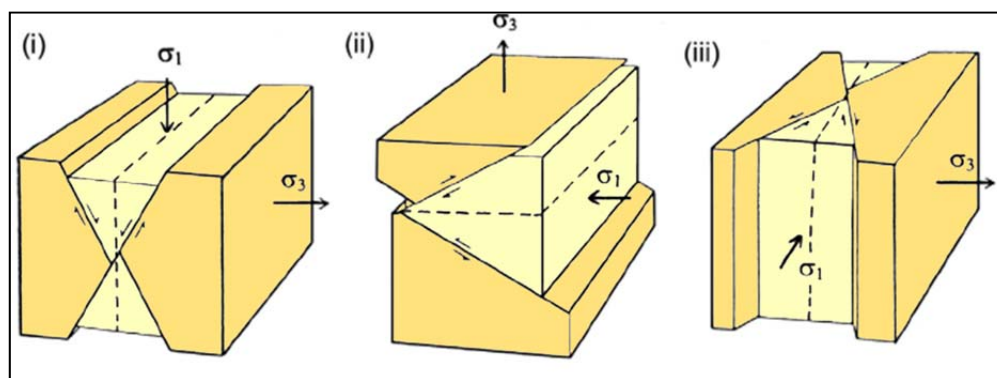


Figura 4 - Posicionamento das fraturas extensionais (linha tracejada) e das fraturas de cisalhamento (linha contínua e com movimento indicado por seta) segundo o regime tectônico extensional (i), compressivo (ii) e transcorrente (iii)

Nos regimes extensional e transcorrente, as fraturas extensionais são subverticais; no regime compressivo, elas são subhorizontais. Já, as fraturas de

cisalhamento são subverticais (falhas transcorrentes) no regime transcorrente; de mergulho médio, em torno de 60° (falhas normais), no regime extensional; e de mergulho baixo, em torno de 30° (falhas inversas), no regime compressivo.

Além da magnitude dos esforços e de sua orientação espacial, o padrão de fraturas observado numa dada área também pode ser influenciado pelos tipos litológicos presentes. Por exemplo, a intercalação de camadas com propriedades elásticas distintas pode exercer controle sobre a manifestação da deformação rúptil, como descrito por Engelder *et al.* (1993), para uma bacia sedimentar submetida apenas aos esforços gerados pelo peso da pilha de rochas. Nesta bacia, dolomitos apresentam fraturas extensionais e veios, enquanto folhelhos e lamitos apresentam fraturas de cisalhamento; ambas (fraturas extensionais e de cisalhamento) foram geradas sincronicamente sob um único campo de esforços.

2.2 Fluxo de Água Subterrânea em Meios Fraturados e Modelos Conceituais

Tradicionalmente, os estudos de fluxo em aquíferos fraturados podem ser feitos com base em fraturas individuais ou grupos de fraturas (abordagem do meio descontínuo), ou através da substituição do meio fraturado por um meio poroso representativo (abordagem do meio contínuo). Segundo Novakowski (1995), a primeira é considerada mais eficaz do que a segunda, a qual precisa de valores de condutividade hidráulica, porosidade e compressibilidade definidos (Domenico & Schwartz, 1990). Isso se deve, principalmente, ao fato de apenas algumas fraturas individuais, ou zonas de fraturas estreitas, serem mais importantes para a alta produtividade em poços, conforme observado por diversos autores (Bertachini, 1987; Menegasse, 1991; Loiselle & Evans, 1995). Nowakowski (1995) verifica a mesma relação na circulação e transporte de contaminantes.

Para quantificar o fluxo que ocorre em um grupo de fraturas, Snow (1968) desenvolveu a denominada lei cúbica, que relaciona a condutividade hidráulica com a densidade e a abertura das fraturas (equação 1). Porém, por ter sido derivada da lei de Darcy, a lei cúbica é válida para condições ideais de fluxo linear e laminar, em que as fraturas são delimitadas por paredes paralelas e lisas. Estas condições são raras na natureza, pois as fraturas são rugosas em maior ou menor grau.

A equação da lei cúbica, mostra que a condutividade hidráulica é proporcional ao cubo da abertura das fraturas e, apenas, diretamente proporcional à densidade

de fraturas. Isto explica a conclusão obtida em estudos realizados em poços de captação de água subterrânea que sugerem que a produção é relativamente independente da quantidade de fraturas atravessadas (Gale & Rouleau, 1983; Brizkishore, 1993).

Apesar de exercer o maior controle sobre a transmissividade das fraturas e, portanto, na determinação dos caminhos preferenciais do fluxo da água subterrânea, a abertura dificilmente é determinada de forma direta. Na prática, determina-se a transmissividade (T) de um dado intervalo por meio de ensaios realizados em campo e, através da equação 2, derivada da lei cúbica, calcula-se a abertura individual de cada fratura. Dessa forma, é possível determinar a abertura equivalente da fratura, ou seja, a abertura de uma fratura de paredes lisas e paralelas, que seria responsável pela T medida no teste.

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

$$b = \left(\frac{T12\mu}{n\rho g} \right)^{1/3} \quad (\text{Equação 2})$$

Para o entendimento do fluxo de água subterrânea em aquíferos fraturados é, ainda, fundamental caracterizar os seguintes parâmetros geométricos das fraturas: rugosidade, preenchimento, grupos de fraturas (atitudes), densidade, comprimento, e conectividade, sendo que esta é resultado dos três últimos. A rugosidade é responsável por variações na abertura, podendo resultar no acanalamento do fluxo; o preenchimento, dependendo de sua distribuição (ou mesmo composição, e.g., areia), pode provocar o fechamento total ou parcial das fraturas. A conectividade configura a rede de fraturas em que haverá fluxo e armazenamento, influenciando, portanto, o comportamento do aquífero em longo prazo (Odling *et al.* 1999).

Diversos autores têm demonstrado que as distribuições de comprimento, densidade e conectividade das fraturas variam em função da escala de observação, resultando também em mudanças no fluxo de água subterrânea (e.g. Rouleau & Gale, 1985; Odling, 1997; Zahng *et al.*, 2004). Segundo Odling (1997), apenas as orientações dos principais grupos de fraturas podem ser consideradas independentes da escala.

Variações litológicas também podem desempenhar um papel importante no controle da circulação de água subterrânea, pois: (1) tipos litológicos distintos, em

virtude dos diferentes comportamentos mecânicos, podem desenvolver padrões e tipos de fraturas distintos, como descrito no item 2.1; (2) contatos entre tipos litológicos distintos podem ser, eles próprios, caminhos importantes de fluxo, ou ainda, controlar a propagação de fraturas de uma camada para outra. Diversos estudos (Ball & Herbert 1993, Chilton & Foster 1995) identificaram fluxo relativamente importante no contato entre a rocha francamente alterada e a rocha sã, em rochas cristalinas; porém, a avaliação do fluxo na porção alterada da rocha é bastante difícil, devido à sua descontinuidade lateral (UNESCO, 1984).

A determinação da permeabilidade de aquíferos, em escala regional, pode ser auxiliada pela definição de “domínios hidroestruturais”, os quais correspondem a domínios estruturais, cujas distintas características estruturais afetam as propriedades hidráulicas dos aquíferos (Surrette *et al.*, 2008). A influência de tais domínios hidroestruturais foi verificada por Fernandes *et al.* (2005), no seu estudo de determinação de áreas com maior capacidade de produção. Para a área de rochas pré-cambrianas do Estado de São Paulo, estes autores constataram que a compartimentação em blocos geológicos, delimitados por grandes zonas de cisalhamento, permitiu a identificação de zonas de diferentes potenciais de produção. Outros fatores, tais como litologia, densidade e intersecção de lineamentos, além de espessura do manto inconsolidado, mostraram exercer controle muito menor, ou mesmo nenhum controle, sobre a variação da produção de poços, na escala estudada (1:1.000.000).

Estudos de aquíferos cristalinos, em diversos contextos geológicos, têm demonstrado que a neotectônica e/ou os campos de esforços atuais têm sido frequentemente associados com a orientação das fraturas mais abertas e, portanto, mais transmissivas (*e.g.* Barton *et al.*, 1995; Fernandes, 1997; Ferril *et al.*, 1999; Morin & Savage, 2003; Fernandes & Rudolph, 2001; Fernandes *et al.*, 2005).

Barton *et al.* (1995), Ferril *et al.* (1999) concluíram que as fraturas mais transmissivas são paralelas ao esforço horizontal máximo (SHmax) ou fazem ângulo agudo de até 30-40° com o SHmax no campo de esforços atual, ou seja, são do tipo extensional ou de cisalhamento. Fernandes (1997) e Fernandes & Rudolph (2001) sugerem que os poços próximos a lineamentos paralelos às fraturas extensionais são significativamente mais produtivos do que aqueles próximos a lineamentos paralelos às fraturas de cisalhamento, ambas geradas nos mesmos eventos de idade quaternária. Existe um consenso sobre as fraturas extensionais possuírem

maior abertura hidráulica, ao contrário das falhas ou zonas de cisalhamento, que apresentam comportamento ambíguo. Segundo Caine *et al.* (1996), as zonas de falhas podem atuar como barreiras hidráulicas, condutos ou um sistema misto de barreira e conduto. E ainda, de acordo com UNESCO (1984), a permeabilidade das fraturas de cisalhamento varia muito ao longo da sua história de deformação, sendo maior em estágios mais avançados de desenvolvimento.

Eventos tectônicos recentes podem, ainda, reativar fraturas pré-existentes e favorecerem a sua abertura. Morin & Savage (2003) relatam que, quando reativadas, as fraturas subverticais paralelas ao SHmax são muito mais transmissivas do que aquelas de orientação perpendicular.

A representação mais próxima possível das reais condições de ocorrência e modo de circulação da água subterrânea, em bases tridimensionais, constitui o principal objetivo de um modelo, seja ele conceitual ou matemático (Lousada & Campos, 2005). Segundo Rosen & Legran (2000), os modelos conceituais podem ser imprecisos ou conter simplificações, no entanto, devem apresentar subsídios para o conhecimento dos aquíferos e para sua gestão.

De modo geral, os modelos conceituais são formulados por meio de observações locais e específicas, associadas com o conhecimento sobre o comportamento geral da água subterrânea em determinado aquífero (Carrera *et al.*, 2005). Esses modelos compõem a base para a elaboração de modelos matemáticos e computacionais, em geral, mais robustos e complexos (Lousada & Campos, 2005).

A modelagem computacional de aquíferos fraturados têm sido realizada através do conceito de redes de fraturas discretas - DFN (*discrete fracture networks*), como pode ser verificado, por exemplo, nos estudos de caso de Surrette *et al.* (2008), Sturzenegger *et al.* (2011) e Voeckler & Allen (2012). Este método utiliza os dados coletados, referentes às características geométricas de fraturas (*e.g.* distribuição da orientação, comprimento e densidade) de uma determinada região, para gerar uma representação 3D da rede de fraturas através de uma abordagem estocástica (Dershowitz *et al.*, 1998); isto significa que são utilizadas funções de distribuição de probabilidade no processo de geração do sistema de fraturas e, portanto, nunca são obtidos modelos idênticos.

2.3 Aplicação de Perfilagens Geofísicas e Geologia Estrutural em Estudos de Aquíferos Fraturados

Segundo Keys (1968), a aplicação de técnicas de perfilagens geofísicas para estudos hidrogeológicos se desenvolveu a partir da adaptação de tais técnicas previamente empregadas em estudos de petróleo. As primeiras perfilagens aconteceram na década de 60 (e.g. Bryant, 1960). Keys (1968) descreveu, pioneiramente, os equipamentos e os procedimentos utilizados em perfilagens de poços de água subterrânea.

Desde então, as técnicas e sondas de perfilagens têm se desenvolvido continuamente e sido amplamente aplicadas em estudos de aquíferos fraturados cristalinos (e.g. Paillet & Ollila, 1994; Paillet, 1995; Stumm, 2001; Johnson *et al.*, 2002, Johnson & Williams, 2003 e Pino, 2012) e sedimentares (e.g. Morin *et al.*, 1997, 2000; Williams & Paillet, 2002). Comumente, estes trabalhos empregam tanto perfilagens convencionais (cáliper, raios gama, resistividade, potencial espontâneo, temperatura da água) como avançadas (imageamento óptico - OTV, imageamento acústico - ATV - e *flowmeter*, ferramenta que mede a velocidade do fluxo de água em profundidades específicas do poço).

O conjunto de perfilagens convencionais, por si só, não fornece indicações claras e inequívocas acerca da distribuição das fraturas, sendo necessária a utilização de perfilagens de imageamento (OTV e/ou ATV), que permitem uma identificação da distribuição e da densidade de fraturas muito mais confiável, além de fornecerem atitudes de estruturas planas, como fraturas, foliações e acamamento (Paillet, 1995). Porém, ainda segundo Paillet (1995), apenas essas técnicas não permitem a identificação exata das zonas de fluxo, pois somente uma pequena parte das fraturas presentes são responsáveis pela entrada e saída de água, não existindo uma maneira apenas visual de distingui-las das fraturas não permeáveis. Portanto, o uso de perfilagens de alta resolução para medir diretamente o fluxo associado a determinadas fraturas, por meio de *flowmeters*, é fundamental.

Por essas razões, a interpretação conjunta das mais diversas perfilagens tem sido satisfatoriamente utilizada para a determinação de feições geológicas e de zonas hidraulicamente ativas, permitindo a otimização de recursos e de tempo nos estudos hidráulicos e de transporte de contaminantes nos aquíferos fraturados.

No Brasil, o uso de perfilagens geofísicas em estudos hidrogeológicos foi introduzido, no final da década de 70, para auxiliar a construção de poços em aquíferos sedimentares nos projetos de captação de água subterrânea realizados pelo DAEE (Paula e Silva, 2003). Porém, segundo o autor, a introdução de equipamentos computadorizados e desenvolvidos especificamente para as investigações hidrogeológicas ocorreu apenas em 1995. As perfilagens realizadas eram de potencial espontâneo, resistividade normal e induzida, raios gama e perfil sônico.

O uso de perfilagens para estudos hidrogeológicos em aquíferos fraturados é ainda mais recente, podendo ser citados alguns exemplos, como: Nery & Macari (2006) e Wahnfried (2010), nos estudos de rochas basálticas da Formação Serra Geral; L'apicciarella (2009) e Alves (2008), em aquíferos cristalinos situados no Estado de São Paulo; e Guerra (2010), em aquífero fraturado constituído de itabirito, em Nova Lima-MG. Os tipos de perfilagens empregados nesses trabalhos foram: imageamento acústico (ATV) em L'apicciarella (2009) e Alves (2008); resistividade e imageamento acústico da rocha e temperatura e condutividade da água em Wahnfried (2010); raios gama, potencial espontâneo, perfil sônico, cáliber e resistividade em Nery & Macari (2006); e raios gama, cáliber, resistividade e óptica em Guerra (2010). Portanto, no Brasil, ainda não é comum a integração de uma grande diversidade de perfilagens, como ocorre nos estudos internacionais; principalmente, no que diz respeito às perfilagens mais avançadas (OTV, ATV e de *flowmeter*).

Os dados estruturais provenientes de perfilagens devem, idealmente, ser complementados por levantamentos realizados em afloramentos. Uma vantagem da amostragem em afloramentos é que esta permite a obtenção de informações não observáveis nos dados de perfilagens, como comprimento e interação entre fraturas de diferentes grupos (Priest, 1993). Além disso, comparando a distribuição e a orientação das fraturas identificadas nos dados de perfilagens e de afloramentos, é possível estimar a distribuição do sistema de fraturas em escala de menor detalhe (Paillet & Ollila, 1994). Este procedimento se torna ainda mais importante quando os poços perfilados são verticais, havendo amostragem não representativa das fraturas subverticais, ou não possuem adequada variação de orientação e inclinação, o que resulta na não contemplação de todos os grupos de fraturas presentes (ver item 4.5.1).

Um dos métodos de coleta de dados em afloramentos bastante utilizado para caracterizar sistemas de fraturas consiste no levantamento sistemático de fraturas ao longo de *scanlines* (a sua definição se encontra no item 3.3). Segundo Priest (1993), este método é ideal para a caracterização do sistema de fraturas e de outras propriedades geométricas de grande escala, devido ao rigor estatístico e à relativa simplicidade do processo de amostragem. Rouleau & Gale (1985), Paillet & Ollila (1994), Alves (2008), Pino (2012) são exemplos de trabalhos que utilizaram dados estruturais de perfilagens em conjunto com dados de afloramentos; dentre os quais, Rouleau & Gale (1985) e Pino (2012) fizeram uso da técnica de amostragem por *scanline*.

Vale salientar que, conforme observado por Neuman (2005), ambos os métodos de coleta em superfície (afloramentos) e de subsuperfície (perfilagens) são limitados, considerando que eles fornecem muito mais informação a cerca da densidade e da orientação das fraturas, do que de sua forma e comprimento, sendo que todos esses parâmetros são igualmente importantes para a elaboração de modelos de redes de fraturas. O autor ainda ressalta que a maior dificuldade na utilização de dados geológicos e geofísicos, essenciais na determinação da geometria das fraturas, nos estudos voltados para a caracterização de aquíferos fraturados, consiste no fato de tais dados, por si só, não fornecerem nenhuma informação quantitativa sobre a abertura das fraturas do modo como é necessário na avaliação de fluxo.

2.4 Geologia Regional e Hidrogeologia

2.4.1 A Bacia de São Paulo e Seu Embasamento Pré-Cambriano

A cidade de São Paulo está instalada sobre os sedimentos da Bacia de São Paulo e seu embasamento cristalino de idade pré-cambriana. A Bacia de São Paulo insere-se no Sistema de Riftes da Serra do Mar, assim denominado por Almeida (1976), posteriormente renomeado por Riccomini (1989) como Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB). O desenvolvimento das bacias que compõem o RCSB foi fortemente controlado pela reativação do denso sistema de zonas de cisalhamento neoproterozoico, durante o Paleógeno (Riccomini 1989, Riccomini *et al.* 2004). A Bacia de São Paulo se configurou como um hemigráben de direção ENE, basculado

para NNW, com borda norte retilínea, controlada pelas zonas de cisalhamento Taxaquara-Jaguari, e borda sul irregular, onde as unidades da Bacia repousam sobre o embasamento cristalino pré-cambriano. O seu preenchimento sedimentar consiste em depósitos continentais terciários e coberturas colúvio-aluviais quartenárias (Riccomini, 1989; Riccomini & Coimbra, 1992).

Os sedimentos terciários são compostos pelo Grupo Taubaté, constituído da base para o topo pelas formações Resende, Tremembé e São Paulo, e pela Formação Itaquaquetuba, que foi depositada diretamente sobre o embasamento (figura 5).

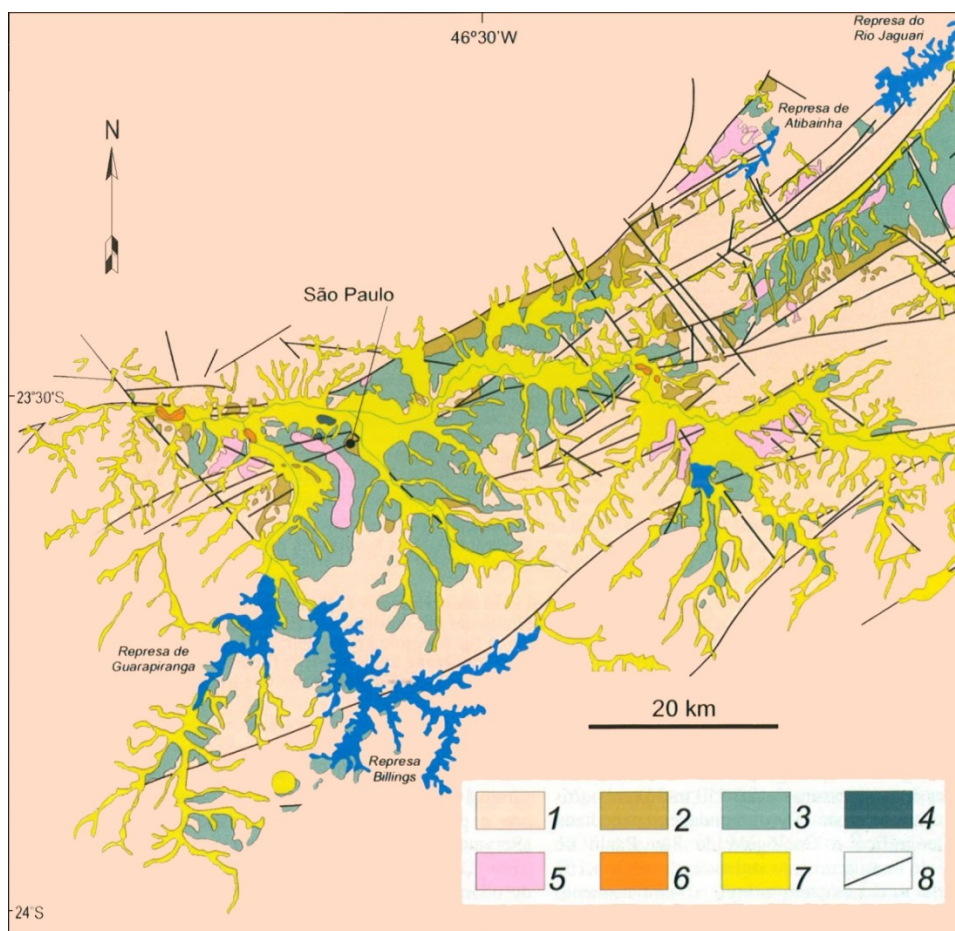


Figura 5 - Mapa geológico da Bacia de São Paulo e porção sudoeste da Bacia de Taubaté (retirado de Riccomini *et al.*, 2004)

Legenda: 1 - Embasamento pré-cambriano; 2 - Formação Resende (sistema de leques aluviais proximais); 3 - Formação Resende (sistema de leques aluviais medianos a distais); 4 - Formação Tremembé; 5 - Formação São Paulo; 6 - Formação Itaquaquetuba; 7 - Sedimentos quaternários; 8 - falhas cenozóicas, em parte reativadas do embasamento pré-cambriano

A Formação Resende preenche mais de 80% da Bacia de São Paulo e corresponde a depósitos de leques aluviais que gradam para depósitos relacionados

à planície aluvial de rios entrelaçados, apresentando diamictitos e conglomerados, nas áreas proximais dos leques aluviais, e lamitos arenosos e arenitos de coloração esverdeada nas porções medianas a distais. A Formação Tremembé corresponde a depósitos de sistema lacustre do tipo *playa-lake* e ocorre como camadas tabulares de argilas verdes maciças, intercaladas com argilas escuras, ricas em matéria orgânica. A Formação São Paulo é constituída por depósitos de sistema fluvial meandrante e, na Bacia de São Paulo, apresenta duas litofácies principais: arenitos conglomeráticos com estratificações cruzadas de pequeno a médio porte e arenitos médios a grossos que gradam para sedimentos mais finos, com estratificações plano-paralelas horizontais. A Formação Itaquaquetuba encerra depósitos de sistema fluvial entrelaçado, que se situam sob os aluviões holocênicos dos rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí e são considerados mais jovens do que os depósitos da Formação São Paulo (Riccomini, 1989; Takiya, 1991, Riccomini & Coimbra, 1992).

O embasamento cristalino sobre o qual foram depositados os sedimentos da Bacia de São Paulo, situa-se no contexto geotectônico do Terreno Embu, apresentado na síntese elaborada por Heilbron *et al.* (2004), inserido na porção central da Província Mantiqueira, definida por Almeida *et al.* (1977). O Terreno Embu é limitado, a norte e a sul, pelas espessas zonas de cisalhamento destrais de Caucaia - Rio Jaguari e Cubatão, respectivamente; a norte da primeira ocorre o Terreno Apiaí-Guaxupé (na porção do Domínio Apiaí-São Roque), e a sul da segunda, os Terrenos Curitiba e Costeiro. Em sua extremidade nordeste, o Terreno Embu acunha-se em direção ao Terreno Juiz de Fora.

O Terreno Embu é composto, principalmente, por rochas metassedimentares do Complexo Embu (Hasui, 1975 e Hasui & Sadowski, 1976) e, restritamente, por ortognaisses migmatizados do Complexo Rio Capivari (Fernandes, 1991), que constituem o embasamento do Complexo Embu, de idade paleoproterozoica (ca. 2,0 Ga; Babinski *et al.*, 2001). O Complexo Embu foi dividido por Fernandes (1991) em três unidades estratigráficas: Redenção da Serra, Rio Paraíbuna e Rio Una (figura 6).

A Unidade Redenção da Serra, de maior extensão em área, constitui-se essencialmente por gnaisses peraluminosos e biotita gnaisses de composição tonalítica-granodiorítica, com intercalações de anfibolitos, rochas cálciossilicáticas e quartzitos. A Unidade Rio Paraíbuna assemelha-se em sua composição com a

Unidade Redenção da Serra, apresentando, porém, maior quantidade de quartzitos e rochas cálcio-silicáticas. A Unidade Rio Una compõe uma sequência psamo-pelítica rítmica, ou seja, composta pela intercalação de xistos e quartzitos impuros, quase sempre delimitada por zonas de cisalhamentos. Fernandes (1991) sugere a hipótese de que a Unidade Rio Una seja mais jovem do que as unidades Redenção da Serra e Rio Paraíbuna, e que ambas constituiriam o nível basal do Complexo Embu, representando variações laterais de um mesmo ambiente deposicional.

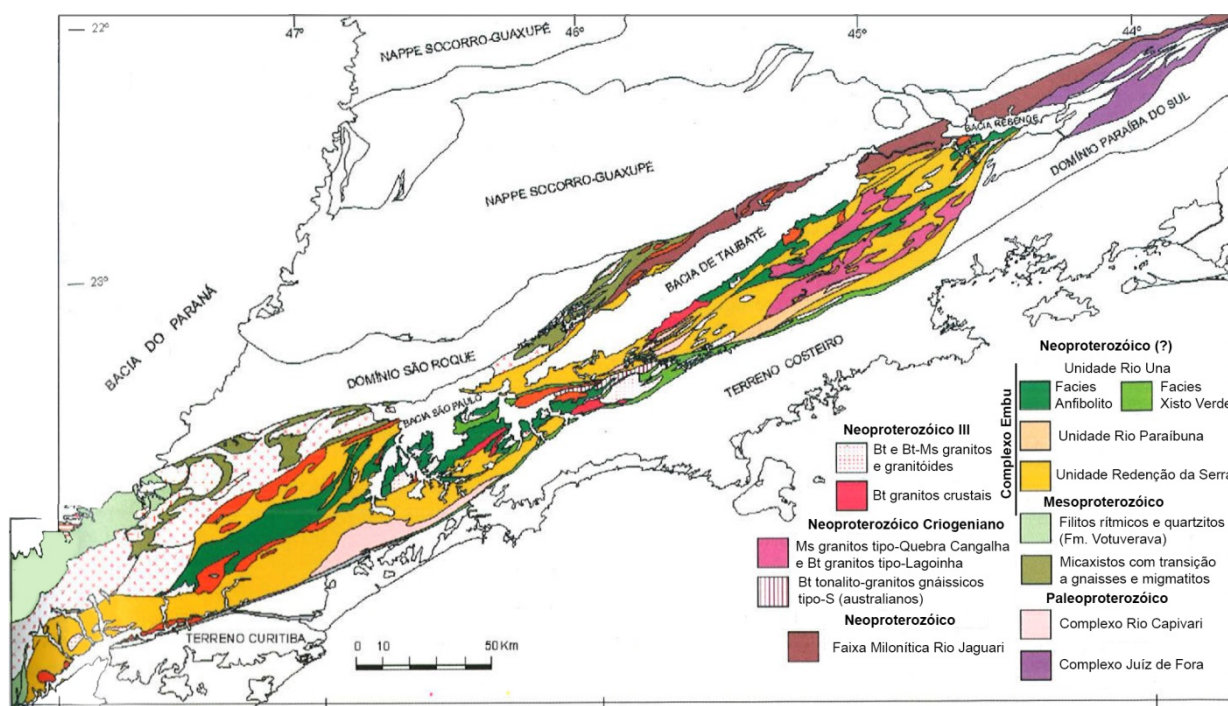


Figura 6 - Mapa geológico dos Terrenos Embu e Apiaí-Guaxupé (modificado de Heilbron *et al.*, 2004)

Hasui (1983) infere que a sedimentação do Complexo Embu teria ocorrido no Proterozoico Médio a Superior e, concordantemente, Fernandes (1991) sugere um limite inferior de 1400 Ma. O metamorfismo principal, em geral, se deu na facies anfíbolito, localmente passando para anfíbolito alto; de forma mais restrita, também se deu na facies xisto verde, por exemplo, em xistos correlatos à Unidade Rio Una, no sudeste da Bacia de São Paulo (Fernandes, 1991). Assume-se que o pico metamórfico ocorreu ca. 790 Ma (Vlach, 2001), idade compatível com aquelas sugeridas por outros autores (Vieira & Tassinari, 1988; Cordani *et al.*, 2002).

As rochas do Complexo Embu foram constantemente deformadas, gerando feições estruturais sobrepostas, as quais são brevemente descritas por Heilbron *et al.* (2004). Segundo os autores, a xistosidade S_1 é reliquiar e guarda o registro das

paragêneses de alta temperatura; a xistosidade S₂ constitui a foliação principal, que possui mergulho fraco a médio para SE, admite dobras intrafoliais e pequenas dobras recumbentes, e a qual associa-se a uma intensa lineação mineral e de estiramento, sensivelmente orientada a NE; a xistosidade S₃ corresponde a uma crenulação que deforma a foliação através de um dobramento inclinado e apertado, vergente para NW.

Intimamente associada à história da deformação do Complexo Embu, houve uma ampla intrusão de rochas granitóides (figura 6). Janasi *et al.* (2003) sugere que tais intrusões ocorreram em diversos eventos geológicos, durante um intervalo de cerca de 200 milhões de anos, ao final do Neoproterozoico (780 - 580 Ma). Entretanto, grande parte dessas manifestações graníticas teria ocorrido durante o intervalo de 610 - 580 Ma, sendo consideradas intrusões sin-orogênicas.

Diferentemente dos terrenos adjacentes, onde houve um magmatismo marcado essencialmente por granitos francamente metaluminosos (horblenda-biotita granitos porfiríticos; Janasi & Ulbrich, 1991 *apud* Heilbron *et al.*, 2004), peculiarmente, no Terreno Embu, há uma grande ocorrência de granitos marginal a francamente peraluminosos, especialmente a leste da cidade de São Paulo (Janasi *et al.*, 2003). Segundo estes autores, as variações petrográficas mais comuns nesses granitos são: biotita granitos porfiríticos, biotita-muscovita leucogranitos brancos e turmalina-granada granitos.

2.4.2 Estruturas Rúpteis e Neotectônica

A porção central da Província Mantiqueira é caracterizada pela presença de um sistema de extensas zonas de cisalhamento que ocorre sub-paralelamente à costa Sudeste e Sul do Brasil (figura 7), chegando até o Uruguai (Sadowski & Campanha, 2004). Essas zonas de cisalhamento são orientadas segundo ENE a E-W (Sadowski & Motidome, 1987), subverticais, profundas e, predominantemente, transcorrentes dextrais, com componente transpressivo (Trouw *et al.*, 2000). Tais estruturas exercem um importante controle nos contatos entre as unidades estratigráficas - como visto anteriormente, elas delimitam o Terreno Embu e o contato norte da Bacia de São Paulo - e, por isso, foram constantemente utilizadas

na delimitação de compartimentos tectônicos (Hennies *et al.*, 1967; Rideg, 1974; Hasui & Sadowski, 1976).

Nos terrenos Embu e Apiaí-Guaxupé, Heilbron *et al.* (2004) relaciona o desenvolvimento de tais zonas de cisalhamento a um importante episódio colisional da Província Mantiqueira ocorrido entre 605 - 520 Ma, com clímax em 580 Ma. De fato, a forma alongada com direção NE de alguns batólitos, que, muitas vezes, estão em contato com uma zona de cisalhamento, demonstra forte relação entre as intrusões magmáticas e as zonas de cisalhamento.

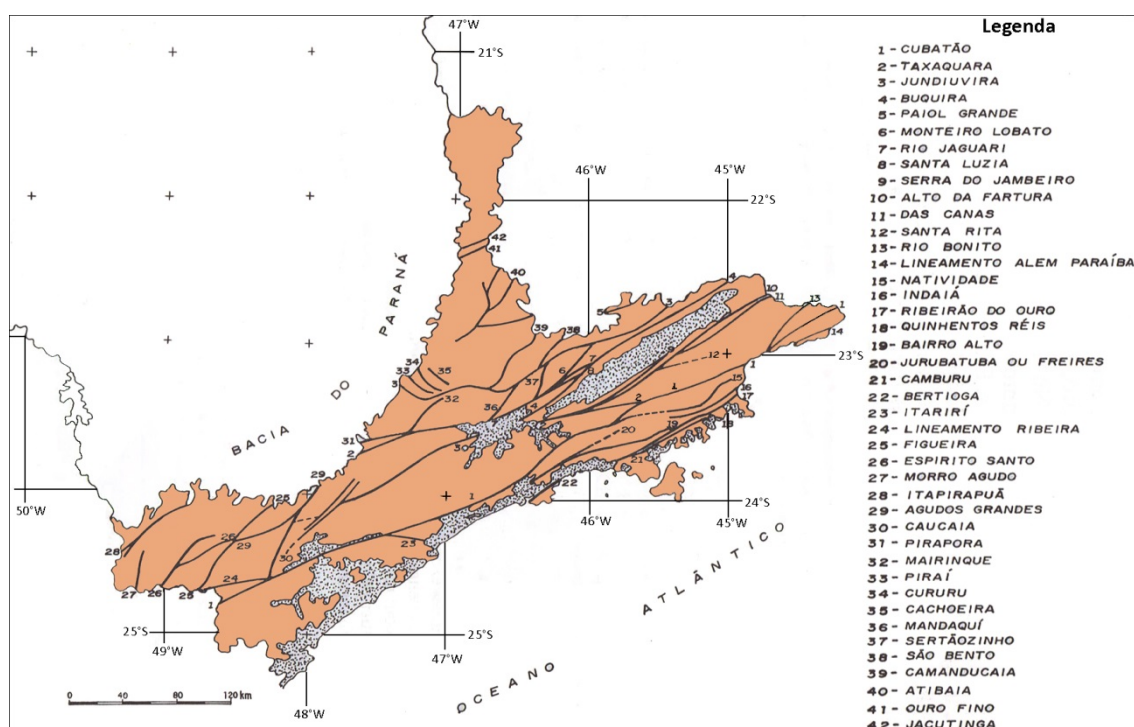


Figura 7 - Principais falhamentos do Estado de São Paulo (retirado de Hasui *et al.*, 1981)

Após o seu estabelecimento no embasamento cristalino, as zonas de cisalhamento passaram por importantes episódios de reativação, durante o Mesozoico-Cenozoico. Segundo Sadowski & Campanha (2004), a Reativação Wealdeniana (Almeida, 1967) - que se iniciou no Jurássico Superior e culminou na ruptura continental e abertura do Atlântico Sul no Cretáceo - foi fortemente condicionada pela rede de falhamentos pré-cambriana. Durante o Cenozoico, como consequência da evolução da margem continental, as zonas de cisalhamento foram novamente reativadas, originando as bacias do RCSB (Riccomini, 1989).

Entretanto, o Cenozoico não foi cenário apenas de reativações de falhas, tendo sido documentada por diversos autores uma série de eventos tectônicos, no Estado de São Paulo, responsáveis pela geração de novos falhamentos. Na tabela 1, modificada de Fernandes & Mello (2004), observa-se uma síntese dos resultados de parte desses estudos. A tabela demonstra que para diferentes áreas estudadas, os eventos tectônicos ocorrem de forma variada, fato que possibilita inferir que determinadas circunstâncias regionais podem influenciar na atuação e na posição dos esforços principais.

Tabela 1 - Eventos tectônicos mesozoicos-cenozoicos determinados por diferentes autores (adaptado de Fernandes & Mello, 2004)

Autor e área estudada	CRETÁCEO	TERCIÁRIO		QUATERNÁRIO		
	K SUPERIOR	PALEÓGENO	NEÓGENO	PLEISTOCENO	HOLOCENO	
Riccomini <i>et al.</i> (1989) Rift Ccontinental do Sudeste do Brasil		E1 σ_3 NNW	TS σ_1 NE	TD σ_1 NW	E2 σ_3 NW	
Salvador & Riccomini (1995), Alto estrutural de Queluz Mancini (1995) Bacia de Taubaté		E1 σ_3 NNW	TS σ_1 NE	TD σ_1 NW	E2 σ_3 NW	C atual σ_1 E-W
Hasui <i>et al.</i> (1995) Região de São Pedro, Neves (1999) Região de Jundiá		E σ_3 NW		T σ_1 NW		
Riccomini (1997) Bacia Bauru					T σ_1 N-S	
Hiruma <i>et al.</i> (2001) Planalto de Campos do Jordão				T σ_1 NW	E σ_3 E-W a NW	T σ_1 NW a E-W
Fernandes (1997), Fernandes & Amaral (2002) Região de Campinas		T σ_1 NE	T σ_1 E-W	T σ_1 NW	T σ_1 N-S	T σ_1 NNE

Legenda: σ_1 - Esforço máximo principal; σ_3 - Esforço mínimo principal; E - Regime extensional; T - Regime transcorrente; C - Regime compressivo.

O estudo realizado por Alves (2008), no município de Cotia (porção oeste da Região Metropolitana de São Paulo), nas rochas do Complexo Embu, constatou a presença de seis grupos de fraturas, que constituem três pares de conjugados, cujos eventos tectônicos responsáveis pela sua formação foram relacionados com aqueles determinados por Riccomini (1989). As atitudes das estruturas identificadas em cada par conjugado e o respectivo evento tectônico, possivelmente, atuante na sua formação foram: estruturas de direção NE com mergulho de ângulo médio e sentidos

opostos, NW e SE, associadas ao regime extensional com σ_3 orientado para NW durante o Paleógeno; estruturas de direção NE e E-W, subverticais, relacionadas ao regime transcorrente com orientação da compressão máxima (σ_1) ao redor de NE durante o Neógeno; estruturas de direção NNW e WNW, subverticais, associadas ao regime transcorrente com σ_1 orientado para NW no Pleistoceno.

Outro trabalho recente (Jacques, 2013) foi realizado com ênfase na caracterização da tectônica rúptil, onde foram identificados três eventos diferentes, de idade mesozoica a cenozoica, responsáveis pela geração de estruturas transcorrentes. Apesar deste trabalho não ter sido desenvolvido no Estado de São Paulo, uma vez que foi conduzido em rochas da borda leste da Bacia do Paraná, na região de Santa Catarina, os eventos identificados foram correlacionados a contextos geodinâmicos de escala continental, associados à ruptura continental do Gondwana, no Mesozoico, e à subducção da costa oeste da Placa Sul-Americana, no Cenozoico. O evento identificado como mais antigo foi associado com a abertura do Oceano Atlântico, no Cretáceo Inferior, tendo a compressão máxima (σ_1) orientada ao redor de N-S e resultando em transcorrências destrais NW e sinistrais NE. O evento intermediário ocorreu na transição entre o Cretáceo Superior e o Terciário, com a mudança de direção do campo de compressão máxima (σ_1) para NE, devido à rotação da Placa Sul-Americana para oeste, gerando transcorrências destrais NNE e sinistrais E-W. O último evento se iniciou a partir do Neógeno e continua atuando, devido à influência da compressão da margem ativa da Placa Sul-Americana sobre a Placa de Nazca, resultando num campo de compressão máxima (σ_1) próximo de E-W (transpressão) e em estruturas destrais NE e sinistrais NW.

Uma proposta sobre a atual direção do SHmax (esforço máximo horizontal) no Brasil, influenciado pela subducção da Placa de Nazca sob a Placa Sul-Americana é apresentada por Assumpção *et al.* (2011), com base em dados de mecanismos focais de terremotos e de medidas *in-situ* (figura 8). Nesta proposta, verifica-se que, enquanto para a região sub-Andina, há um claro predomínio de falhamentos inversos (traços de cor azul) com SHmax de direção geral E-W, no Brasil, ocorre uma variação tanto da direção do SHmax como dos tipos de falhamento (inverso, normal e transcorrente). Vale observar que próximo à cidade de São Paulo, a orientação do σ_1 ocorre, principalmente, para NE, e passa para ENE mais a norte.

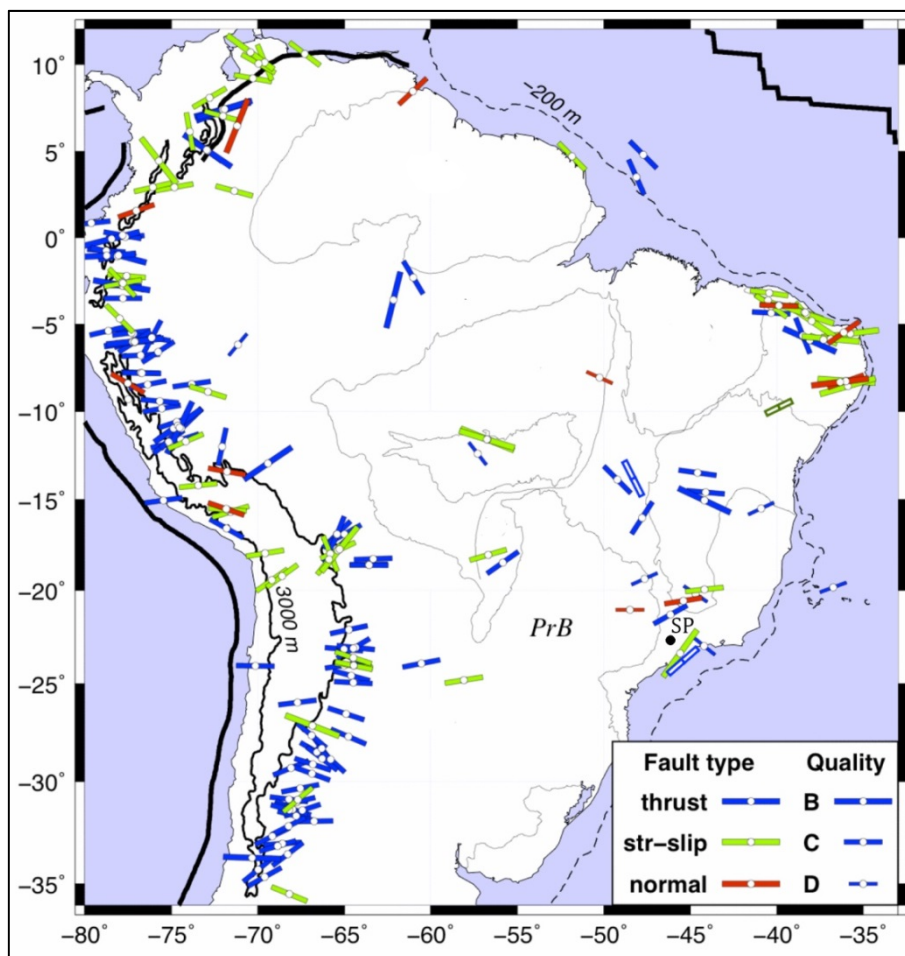


Figura 8 - Mapa com a distribuição da direção do SHmax, intraplaca, para a Placa Sul-Americana (modificado de Assumpção *et al.*, 2011)

Legenda: PrB - Bacia do Paraná; barra cheia corresponde a medidas de mecanismos focais e barra vazia são medidas realizadas *in-situ*

2.4.3 Hidrogeologia

A cidade de São Paulo se situa na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê, cuja delimitação física quase coincide com a da Região Metropolitana de São Paulo (Silva & Porto, 2003). Segundo esses autores, pelo fato da Região Metropolitana de São Paulo estar localizada numa região de cabeceira e constituir o maior aglomerado urbano, sua disponibilidade hídrica por habitante é tão baixa quanto as áreas mais secas do Nordeste brasileiro, apesar de seus índices pluviométricos serem em torno de 1.300 mm por ano. Neste cenário, a água subterrânea é utilizada extensivamente para o abastecimento privado de indústrias, condomínios, hospitais e outros.

As unidades sedimentares da Bacia de São Paulo constituem o Sistema Aquífero Sedimentar (SAS) e as rochas cristalinas o Sistema Aquífero Cristalino (SAC), assim denominados por Hirata & Ferreira (2001). Os sedimentos do SAS correspondem a aquíferos de porosidade primária, livres a semi-confinados, bastante heterogêneos, de extensão local e baixa produtividade. Para a Formação São Paulo (Osp, figura 23), a vazão média dos poços é de 9,5 m³/h e capacidade específica mediana de 0,5 m³/h/m; para a Formação Resende (Ori), a vazão média é de 15,2 m³/h e capacidade específica de 0,31 m³/h/m (Hirata & Ferreira, 2001).

As rochas do SAC constituem aquíferos fortemente heterogêneos e anisotrópicos, cujo potencial de produção dos poços depende da presença de fraturas com maior condutividade hidráulica. Os poços que exploram as unidades de rochas granitóides (PCg e PCgo, figura 23) apresentam vazão média de 9,1 m³/h e capacidade específica mediana de 0,1 m³/h/m; os micaxistos (PCx) apresentam vazão média de 7,1 m³/h e capacidade específica de 0,3 m³/h/m (Hirata & Ferreira 2001). Assim a unidade PCx apresenta potencial um pouco mais elevado que as unidades PCgo e PCg.

O modelo de circulação regional mais aceito mostra que as águas das chuvas recarregam os aquíferos em toda a sua extensão não impermeabilizada (Hirata & Ferreira, 2001). Outra importante recarga ocorre pelas fugas da rede pública de abastecimento de água e de coleta de esgoto. Mesmo as águas das chuvas que se precipitam sobre a cidade acabam escoando para o sistema de águas pluviais. Essas por não receberem manutenção adequada permitem a infiltração das águas para o aquífero, aumentando a proporção de recarga com influência antrópica na área urbanizada. Uma vez ingressando no aquífero, as águas fluem em direção às drenagens superficiais, suas áreas de descarga.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Elaboração de Seções Geológicas

Primeiramente, gerou-se um mapa com a profundidade do topo do embasamento, através de dados dos contatos entre a cobertura sedimentar e o manto inconsolidado, e entre este último e o embasamento cristalino, disponibilizados pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). Para isso, foi utilizado o método de interpolação inverso do quadrado da distância (IDW2), através do *software ArcGIS 9.3*.

A partir deste mapa, foram definidos os principais locais para traçar as seções geológicas, de modo que interceptassem os poços em estudo e as principais variações do topo do embasamento. Os mesmos dados também foram utilizados para a realização de seções geológicas no Projeto Jurubatuba, executado pela empresa Servmar Ambiental e promovido pela Secretaria do Meio Ambiente e pela Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos, e que resultou nos trabalhos de L'Apicciarella (2009) e Governo do Estado de São Paulo (2009). Sendo assim, verificou-se que as seções realizadas anteriormente coincidem com os locais definidos neste estudo, e portanto, tais seções foram ligeiramente modificadas e reaproveitadas no presente trabalho.

As seções geológicas são importantes, pois evidenciam a distribuição espacial e as variações de espessura dos depósitos terciários, do manto de intemperismo e da profundidade do topo do embasamento.

3.2 Análise de Lineamentos

O método de análise de lineamentos foi empregado com a finalidade de obter de maneira rápida e indireta uma análise preliminar dos principais *trends* estruturais da área de estudo, em escala de detalhe e regional. Segundo a definição de O'Leary *et al.* (1976), utilizada neste trabalho, lineamento é “uma feição linear, mapeável, simples ou composta, cujas partes são alinhadas de forma reta ou levemente curva, e que se distingue dos padrões de feições adjacentes e, presumivelmente, reflete um fenômeno de subsuperfície”.

Para o traçado de lineamentos foram elaborados um Modelo Digital do Terreno (MDT) ou um Modelo Digital de Elevação (MDE), nos quais foram aplicadas iluminações que produziram mapas de sombreamento de relevo. A diferença entre os dois modelos consiste no tipo de dado disponível: no primeiro, o modelo é produzido a partir de valores de altitude do nível do solo, obtidos, por exemplo, em mapas topográficos (curvas de nível), levantamentos por GPS ou por altimetria a laser; enquanto, no segundo, é considerada a altitude do dossel das árvores, em áreas densamente florestadas, ou de casas e construções, em áreas urbanas (Grohmann *et al.* 2008). Neste trabalho, foram utilizados tanto MDT (escala de detalhe), quanto MDE (escala regional).

Na escala regional, fez-se uso do mapa de lineamentos apresentado em Fernandes *et al.* (2005), cedido pela pesquisadora Amélia Fernandes na versão digital. Os traçados dos lineamentos foram feitos utilizando MDE, gerado através de imagens obtidas pela missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com resolução espacial de 90 metros. No trabalho de Fernandes (*et al.* 2005) os lineamentos foram traçados manualmente em tela de computador com uma escala fixa, para toda a área do aquífero cristalino, em 1:250.000. Deste mapa de lineamentos original, foi feito um recorte, selecionando parte do Terreno Embu e Bacia de São Paulo, tendo a região de estudo como centro.

Na escala de detalhe, foi gerado um MDT para a região na qual estão localizados os poços do projeto GESOL, utilizando curvas de nível com espaçamento de 5 metros, vetorizadas a partir de duas folhas produzidas pela Emplasa em escala 1:10.000 (Vila Veleiros e Santo Amaro). Pretendia-se obter um MDT, a partir da mesma escala, para cada região onde foram coletados dados em afloramentos (ver item 3.3), para comparar com a área dos poços. Porém, não foi possível obter curvas de nível espaçadas de 5 metros, vetorizadas, para essas regiões. Estavam disponíveis apenas curvas de nível espaçadas de 25 metros, vetorizadas a partir de folhas em escala 1:25.000, cujo MDT não apresentou resolução suficiente para o traçado de lineamentos e, portanto, não foi utilizado.

Para o traçado dos lineamentos, foram geradas imagens de sombreamento (*hillshade*) a partir do MDT, aplicando iluminação com um ângulo de incidência de 45° em quatro rumos diferentes (0°, 45°, 90° e 135°). Utilizando o mesmo MDT, obteve-se um mapa hipsométrico da área de estudo, através da classificação da elevação topográfica. Dentre os métodos disponíveis no Arcgis 9.3, foi adotado o de

quebras naturais, que agrupa valores similares e maximiza a diferença entre as classes, pois o limite de classe é definido por saltos relativamente altos nos valores dos dados. Deste modo, foram definidas cinco classes para os valores de elevação do terreno, que tem como menor e maior cota, respectivamente, 720 e 850 metros.

Através do *software DIPS 5.1*, foram elaborados histogramas onde são representados as direções e os comprimentos dos lineamentos, separadamente, para cada escala.

3.3 Levantamentos Estruturais em Afloramentos

Devido à intensa urbanização da área de estudo, ou proximidades, e a consequente dificuldade de se encontrar afloramentos, o levantamento de dados estruturais foi realizado em pedreiras situadas nos municípios de Embu das Artes, Itapeverica e São Paulo.

Um conjunto de fraturas com atitudes semelhantes é aqui denominado de grupo de fratura, a exemplo do termo utilizado na literatura internacional (*fracture set*), supondo-se que cada um deles tenha sido gerado, mais provavelmente, a partir do mesmo modo de propagação e regime tectônico. As fraturas, no entanto, também podem ocorrer de forma dispersa, dificultando a distinção visual entre grupos com atitudes próximas.

Sendo um dos objetivos do trabalho de campo identificar os principais grupos de fraturas e, se possível, os campos de esforços responsáveis pela sua geração, considera-se que os dados obtidos nos afloramentos devem ser aplicáveis à área de estudos, já que as áreas pertencem a um mesmo compartimento estrutural e tectônico, o Terreno Embu, o qual é delimitado pelas zonas de cisalhamento de Caucaia e de Cubatão (figura 9).

Desse modo, a partir do banco de dados do Sistema de Informações Geográficas de Mineração (SIGMINE), disponibilizado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), foram selecionadas todas as pedreiras ativas da região em questão. Essas pedreiras estão localizadas na figura abaixo, sendo identificadas neste trabalho pelas siglas GS-1, GS-2, GS-3 e GS-4.

O levantamento de dados estruturais nas pedreiras foi realizado ao longo de *scanlines* e em observações pontuais. O método de *scanline* consiste na amostragem de fraturas ao longo de uma linha, utilizando uma trena (figura 10), cujo comprimento é definido de acordo com as dimensões da parede de observação e

com as fraturas presentes. Este método possui a vantagem de ser quantitativo e de fornecer informações sobre o espaçamento entre as fraturas. As observações pontuais, por sua vez, foram efetuadas para amostrar locais isolados com feição estrutural marcante; porém, sem que houvesse necessidade de realização de *scanline*. Mapas de localização das *scanlines* e dos pontos de observação, que constam do item 4.3 dos resultados, foi elaborado através do *software* ArcGIS v.9.3, tendo como base imagens obtidas através do *software* Google Earth.

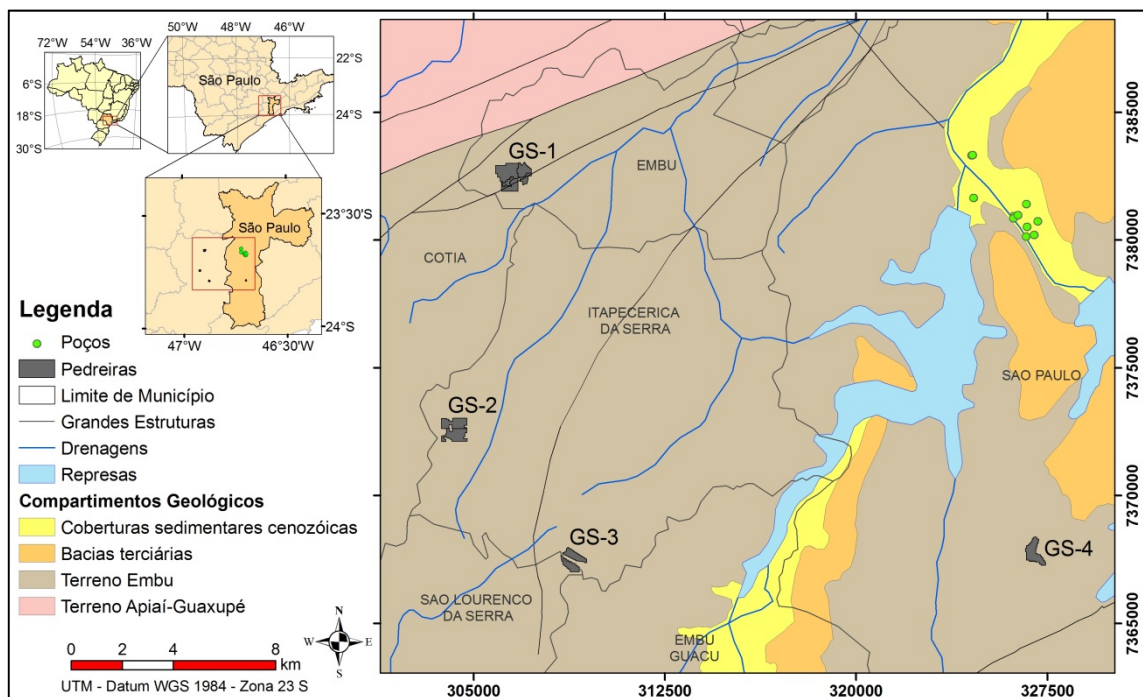


Figura 9 - Localização das pedreiras visitadas e dos poços da área de estudo

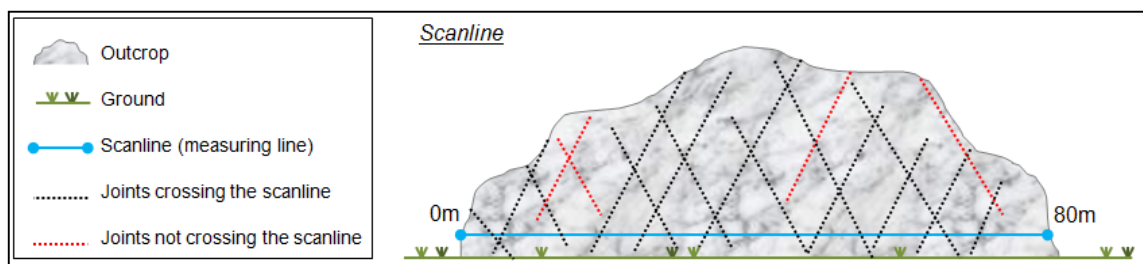


Figura 10 - Esquema da amostragem através do método de *scanline*; são amostradas apenas as fraturas que cruzam a *scanline* (modificado de Pino, 2012)

Uma descrição bastante detalhada da técnica de *scanline* é apresentada em Priest (1993). O autor considera que não há um padrão único para a amostragem por *scanline* e que são desejáveis adaptações da técnica e dos dados coletados de

acordo com as condições locais e com os objetivos dos trabalhos. Com relação à parede de observação, Priest (1993) recomenda que seja uma exposição aproximadamente plana, limpa, suficientemente grande em relação ao tamanho e ao espaçamento das fraturas e cujas estruturas presentes sejam representativas do sistema de fraturas. O mais comum é que scanlines devam ser realizadas em várias paredes de modo a obter um levantamento que seja representativo do afloramento.

Para cada *scanline* realizada, é imprescindível anotar a sua identificação, comprimento, direção e as coordenadas inicial e final. A planilha de campo utilizada neste trabalho para o levantamento de fraturas ao longo de *scanlines* encontra-se no anexo 1.

Os seguintes parâmetros foram coletados de forma sistemática para cada fratura levantada: posição na *scanline*; fratura simples ou ocorrência de zona de fratura, com a respectiva espessura e número de fraturas; atitude (notação da bússola Clar); direção e caimento de estrias de cisalhamento, bem como indicador de sentido de movimento; cor e espessura de alteração; preenchimento; configuração plana ou ondulada; rugosidade; comprimento (foram levantadas as que tivessem comprimento mínimo de um metro); terminação em outra fratura, quando ocorresse. Feições importantes, que não tinham campo específico na planilha, foram anotadas como observações, por exemplo: presença de água e/ou vegetação ao longo da fratura; estrutura pré-existente associada (veio, foliação, etc.); padrões (em *echelon*, em flor, conjugado, anastomosado); e etc.

Croquis, com representação das fraturas presentes na parede de observação, foram elaborados de modo a representar de forma clara as terminações e os ângulos entre as fraturas. O registro fotográfico foi obtido de forma sistemática e possibilitou realizar observações posteriores. Ambos (croquis e fotos) foram realizados em cada *scanline* e na maioria dos pontos de observação deste trabalho.

Além disso, a coleta de dados estruturais também englobou observações de feições que indicassem (a) orientação de campos de esforços (ex., pares conjugados e indicadores cinemáticos) e (b) idade relativa dos grupos de fraturas (ex., terminações de fraturas) de modo a identificar esforços tectônicos e sua superposição ao longo do tempo. Feições diagnósticas de fluxo (alteração, saídas de água, presença de vegetação) também foram coletadas, pois indicam fluxo preferencial ao longo de determinadas fraturas, de modo a poder determinar quais grupos de fraturas devem ser as mais transmissivas.

O processamento dos dados coletados em afloramentos está detalhadamente descrito no item 3.5.

3.4 Perfilagens Geofísicas em Poços Profundos

A consulta dos trabalhos de L'Apicciarella (2009) e Governo do Estado de São Paulo (2009), em que há um acervo de dados dos aspectos construtivos de poços profundos e dos valores de concentrações de contaminantes da água subterrânea, registrados pelo DAEE para a região do canal Jurubatuba (projeto Jurubatuba), levou à seleção de quatro poços para a realização das perfilagens deste trabalho. No desenvolvimento dos estudos citados acima, foram realizadas perfilagens acústicas em seis poços, cujos dados foram disponibilizados para complementar o presente trabalho. Na tabela 2, tem-se informações referentes às coordenadas UTM, cota topográfica, nível estático, nível dinâmico, vazão e capacidade específica dos poços selecionados para a realização das perfilagens neste trabalho (projeto Gesol) e dos poços do projeto Jurubatuba cujos dados de perfilagem acústica foram utilizados no presente trabalho. A localização em planta desses poços consta na figura 11.

Tabela 2 - Coordenadas UTM, cota topográfica e dados de produção dos poços em estudo. GS = Projeto GESOL, JB = Projeto Jurubatuba.

Projeto	Poço	X (UTM)	Y (UTM)	Cota [m]	NE [m]	ND [m]	Vazão [m ³ /h]	Capac. Esp. [m ³ /h/m]
GS	255	326710	7380180	724	80	144	4.08	0.06
GS	256	326740	7380560	723	64	92	11.67	0.41
GS	1204	327020	7380250	724	99	195	14.40	0.15
GS	1346	327170	7380780	726	85	133	3.10	0.07
JB	1501	326220	7380980	723	92	100	11.10	1.37
JB	1502	326210	7380900	723	93	181	4.50	0.05
JB	1503	326390	7381020	723	84	205	7.50	0.06
JB	1249	324650	7381690	724	38	89	6.00	0.12
JB	691	324570	7383360	724	19	77	14.00	0.24
JB	692	324610	7383370	724	12	93	14.10	0.17

As perfilagens realizadas nos quatro poços selecionados foram: temperatura (T), condutividade elétrica (CE), calibre de poço (cáliper), irradiação gama natural (gama), imageamento óptico (OTV), imageamento acústico (ATV) e velocidade de fluxo (*flowmeter*). A execução dessas perfilagens ocorreu em quatro campanhas de

campo. Na primeira, em dezembro de 2011, foram efetuadas perfilações de temperatura, condutividade, cáliper e óptica em três dos poços selecionados; na segunda, em junho de 2012, as mesmas perfilações foram feitas no poço restante; na terceira, em março de 2013, foram realizadas perfilações acústicas em todos os poços; na quarta e última etapa de campo, em abril de 2013, utilizou-se o *flowmeter* em todos os poços. Tais atividades foram conduzidas pela equipe do projeto GESOL, contando com a participação dos pesquisadores: Bruna Fiume, Lucas A. Ribeiro, Paulo L. Lima, Marcos B. Barbosa, Reginaldo A. Bertolo do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP), Amélia J. Fernandes do Instituto Geológico (IG) e Carlos Alberto Birelli do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

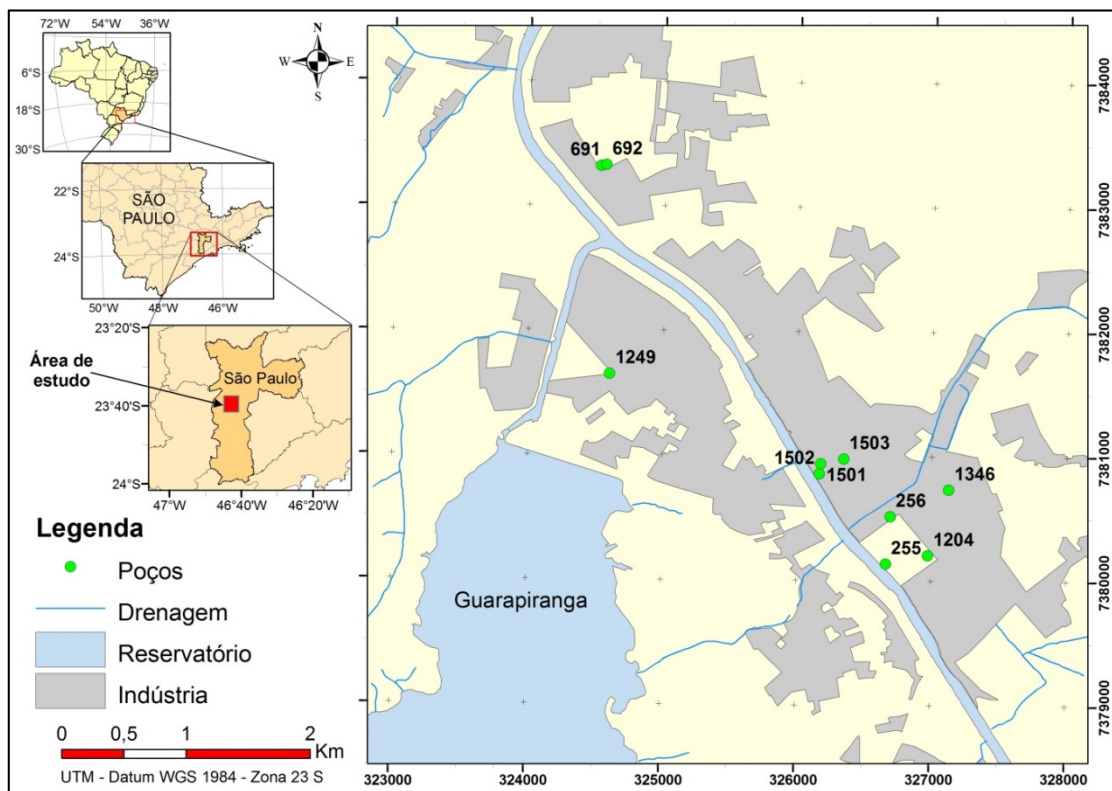


Figura 11 - Localização dos poços em que foram realizadas as perfilações geofísicas deste trabalho (255, 256, 1204 e 1346) e dos poços em que foram disponibilizados os dados de perfilações acústicas realizadas no Projeto Jurubatuba (691, 692, 1249, 1501, 1502 e 1503)

As sondas cáliper, gama, OTV, ATV e *flowmeter* são da marca *Robertson Geologging Limited* e, para a sua utilização, deve-se adotar o arranjo ilustrado na figura 12.

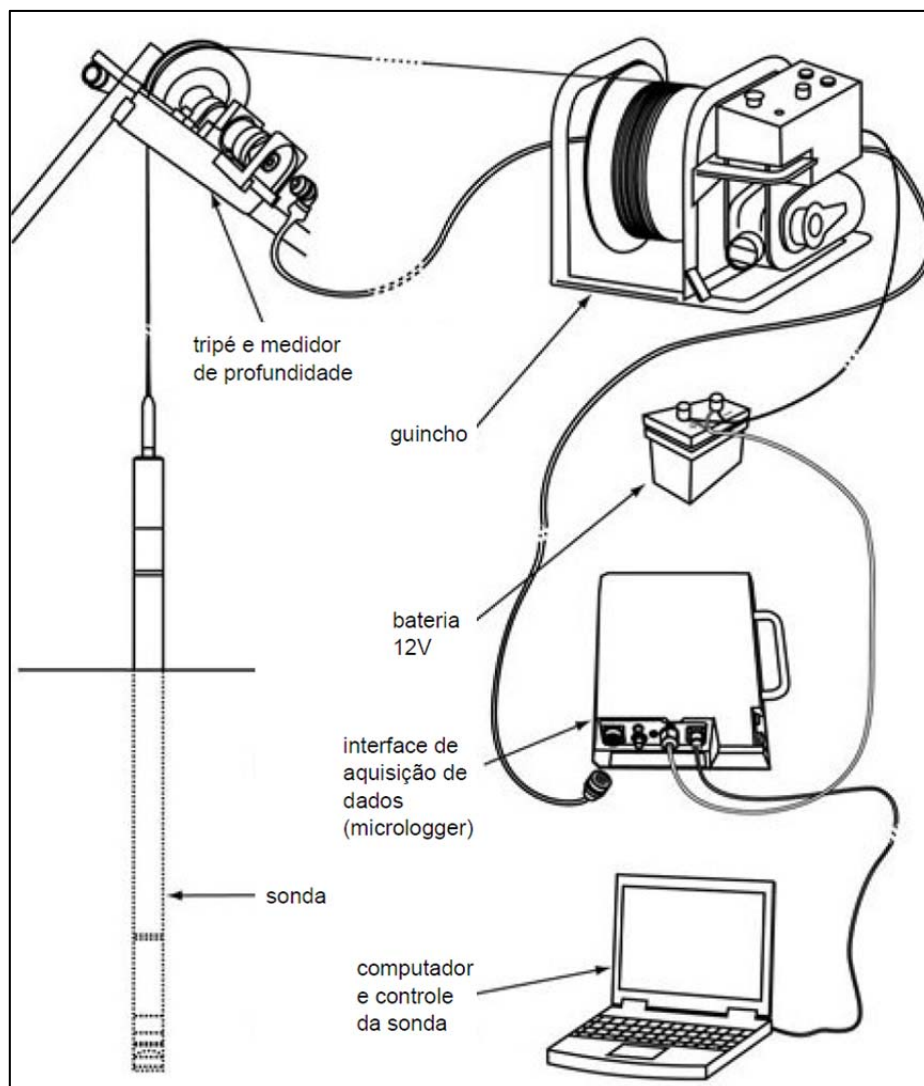


Figura 12 - Arranjo dos equipamentos utilizados para a execução das perfilagens (adaptado de Hubbard *et al.*, 2008)

Esse arranjo é constituído pelos seguintes elementos:

- Cabo de 500 metros conectado à sonda, capaz de transmitir as informações coletadas por esta;
- Guincho adaptado a uma van, responsável pelo controle da velocidade e do sentido de deslocamento do cabo;
- Medidor de profundidade acoplado à uma roldana, por onde passa o cabo da sonda;
- Equipamento de interface denominado *micrologger*, que codifica os dados coletados para o *software WinLogger*, o qual registra os resultados.

Além dos equipamentos citados acima, para a realização das perfilagens, necessita-se da utilização de dois centralizadores, acoplados à sonda, para que o

leitor permaneça centralizado em relação às paredes do poço. Os centralizadores possuem diâmetro próprio para o diâmetro do poço a ser perfilado, são flexíveis, e para as perfilagens OTV e ATV, não podem ser magnéticos. A perfilagem com *flowmeter* pode ser realizada com apenas um centralizador, situado mais próximo da extremidade de leitura da sonda.

Os equipamentos de temperatura e condutividade elétrica foram montados através de materiais disponíveis no LAMO e a velocidade de introdução no poço, com um cabo de 100 m de comprimento, foi controlada manualmente. O registro de suas leituras também foi realizado manualmente.

Para todas as perfilagens, utilizou-se a extremidade superior do tubo de revestimento dos poços como datum de referência, e a sua altura em relação ao piso foi medida em cada poço. O detalhamento dos procedimentos adotados em cada uma das perfilagens, assim como os seus princípios de funcionamento, estão descritos a seguir. A figura 13 apresenta fotografias dos equipamentos utilizados em campo.

O processamento dos resultados obtidos em cada perfilagem foi realizado através do *software* WellCAD v. 4.4, o qual realiza a integração das diferentes perfilagens e, ao mesmo tempo, permite o tratamento de cada uma delas individualmente (e.g. a correção de azimute das fraturas obtidas através do OTV e ATV, devido à declinação magnética local).



a) Medidor multiparâmetro e cabo utilizados nas perfilagens de condutividade elétrica e temperatura, junto ao medidor de nível d'água



b) Hastes do perfilador de calibre, o qual é acoplado ao perfilador de radiação gama



c) Detalhe da câmera e dos LEDs de iluminação do perfilador óptico



d) Extremidade da sonda de imageamento acústico com um dos centralizadores



e) Detalhe do receptor de calor do *Heat Pulse Flowmeter*



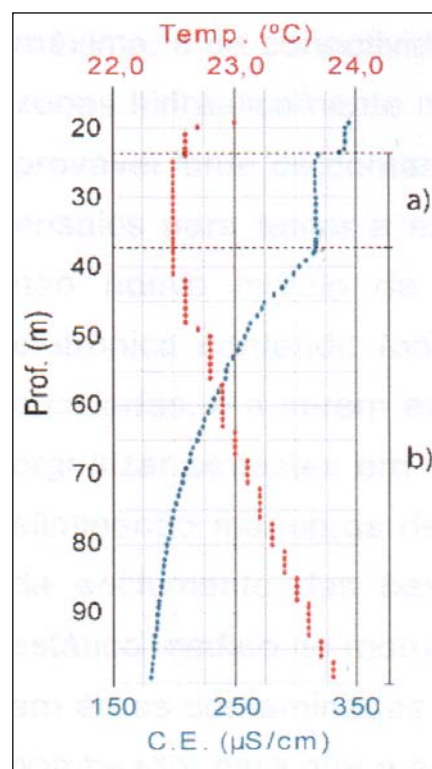
f) Posição do tripé sobre o poço e do guincho sobre carro de apoio

Figura 13 - Equipamentos utilizados nas perfilagens geofísicas

3.4.1 Perfilagem de temperatura (T) e condutividade elétrica (CE) da água

Através das perfilagens de temperatura e condutividade da água é possível identificar profundidades em que, naturalmente, ocorrem entradas e saídas de água, devido à presença de fraturas hidráulicamente ativas (Keys, 1990). Os locais de entrada e saída de fluxo causam uma mudança nos valores de T e de CE, enquanto o intervalo entre essas ocorrências apresentam estabilidade de ambos os parâmetros, uma vez que a água é homogeneizada devido ao fluxo (figura 14).

Figura 14 - Perfil da variação da temperatura e condutividade elétrica da água em função da profundidade (a) presença de fluxo; (b) ausência de fluxo (retirado de Wahnfried, 2010)



Entretanto, Paillet (1995) ressalva que o resultado de tais perfilagens pode levar a uma interpretação ambígua; por exemplo, quando a partir de uma fratura, por onde ocorre entrada de água, houver tanto fluxo ascendente (a saída da água acontece por uma fratura em posição mais rasa), quanto descendente (a saída da água acontece por uma fratura em posição mais profunda). Neste caso, a mudança de temperatura pode ser identificada apenas nos intervalos acima e abaixo da fratura (locais onde ocorre a saída de água), e não em frente a própria fratura (onde se dá a entrada).

Ainda segundo Keys (1990), na ausência de fluxo, a temperatura cresce gradativamente com o gradiente geotérmico, variando cerca de 0,016 a 0,02 °C/m; já no topo do poço, a temperatura da água sofre influência da temperatura do ar, com o qual está em contato.

Neste trabalho, para obter os perfis de T e CE da água, foi utilizado um medidor multiparâmetro (figura 13-a) da marca WTW, modelo LF197, com resolução de 0,1°C e 0,001 mS/s, respectivamente. Considerando que a introdução das demais sondas pode influenciar significativamente nos resultados devido ao

deslocamento da água no interior do poço, as leituras de T e CE foram as primeiras perfilagens a serem realizadas em cada poço perfilado.

3.4.2 Perfilagem calíper e de radiação gama natural

A perfilagem gama natural detecta, através de um cintilômetro (Geiger-Mueller), a energia liberada pelo decaimento nuclear de elementos radioativos (naturalmente em desintegração), registrando o número de decaimentos por unidade de tempo (CPS – contagem por segundo).

Os isótopos radioativos mais comuns na crosta terrestre são: ^{40}K , ^{235}U , ^{238}U e ^{232}Th (Milsom, 2003). Eles estão presentes em determinados minerais, principalmente, em micas, feldspatos e argilominerais. Como as rochas possuem diferentes composições mineralógicas, a perfilagem gama natural é amplamente utilizada para a identificação de litologias, principalmente, em intercalações sedimentares. Em poços revestidos, a intensidade da radiação diminui cerca de 30%, mas ainda é possível a identificação das variações litológicas (Oliveira, 2005).

Na perfilagem calíper, as variações no diâmetro do poço são registradas por um mecanismo composto de três hastes, acoplado na extremidade inferior da sonda (figura 13-b). O alargamento do diâmetro do poço, geralmente, ocorre na intersecção entre a fratura e a parede do poço, e pode ter sido originado, por exemplo, durante a perfuração do poço ou devido a erosão de porções alteradas da rocha (Keys, 1979). Este método consiste num bom indicador indireto da presença de fraturas, no entanto, o autor ainda ressalta que não é possível medir a abertura das fraturas, devido ao diâmetro das hastes do equipamento.

No presente trabalho, as perfilagens calíper e gama foram realizadas simultaneamente através de uma única sonda. As leituras foram registradas durante o soerguimento da sonda para garantir maior precisão nos resultados.

3.4.3 Imageamento óptico (OTV) e acústico (ATV)

As perfilagens de imageamento óptico e acústico geram imagens contínuas, orientadas e planas (figura 15), de 360° da parede do poço, que permitem a

identificação de feições planares, tais como: fraturas, foliações e contatos litológicos, representadas na forma de curvas senoidais (Paillet *et al.*, 1990). As sondas OTV e ATV contêm um sistema de orientação, constituído por acelerômetro e magnetômetro triaxiais, que possibilitam a medição da direção e do mergulho verdadeiros das estruturas observadas nas imagens, com erro de $\pm 1^\circ$ para o azimute e de $\pm 0,5^\circ$ para a inclinação. Além desses erros causados pela acurácia do aparelho, considera-se que pode haver um erro de $\pm 10^\circ$ nos valores de rumo e ângulo de mergulho, devido à própria forma da projeção da fratura na imagem (Paillet & Ollila, 1994). A velocidade dessas perfilagens varia de 1 a 3 m/min, sendo, portanto, mais lenta do que as perfilagens convencionais. Para garantir a qualidade dos resultados, tipicamente, utiliza-se uma velocidade em torno de 1 m/min (Williams & Johnson, 2004). Neste trabalho, as perfilagens OTV e ATV foram realizadas durante o soerguimento, com velocidade entre 1,2 e 1,5 m/min.

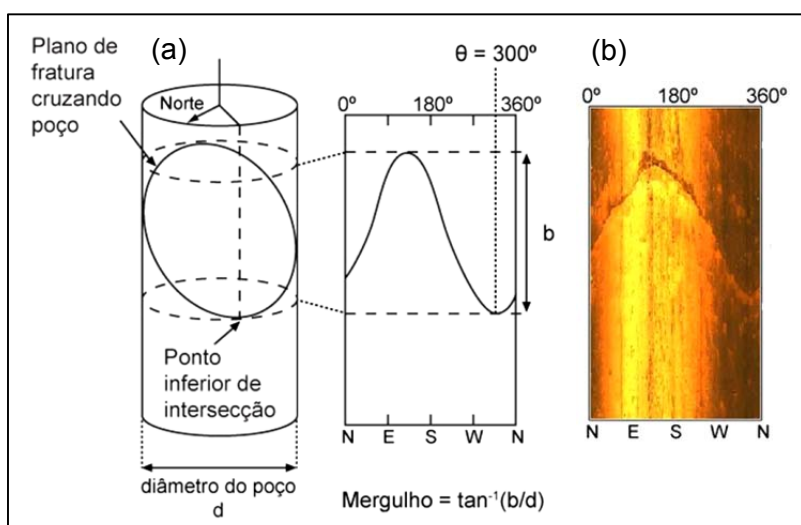


Figura 15 - (a) demonstração da intersecção de uma fratura com um poço, projetada em um plano, o que resulta numa senóide; a partir desta, determina-se o sentido do mergulho (θ), na porção superior, e o seu ângulo, baseado na extensão de b (adaptado de Paillet, 1994); (b) trecho de imagem óptica, com a parede do poço alaranjada e uma fratura interceptada

A sonda utilizada para o OTV é constituída por um anel de LEDs, uma câmera (figura 13-c) capaz de capturar até 60 quadros por segundo e um refletor cônico ou hiperbólico (Williams & Johnson, 2004). As imagens são geradas em cores reais, como nas fotografias. Por isso, algumas feições, tais como litologia, oxidação, precipitação, preenchimentos de fraturas e feições de fluxo, só podem ser identificadas através do OTV. Entretanto, paredes sujas e oxidadas prejudicam a qualidade das imagens.

A sonda ATV (figura 13-d) produz um pulso ultrassônico, através do qual é registrado, em imagens, o tempo de trânsito e a amplitude do sinal refletido; na

primeira, a fratura é indicada por um aumento no tempo de trânsito e o seu resultado é também utilizado para gerar perfis de cáliper com maior resolução do que o cáliper mecânico; na segunda, a fratura que intercepta o poço causa uma dispersão da onda acústica e resulta numa feição de amplitude baixa e contraste alto, ou seja, de cor escura (figura 16; Johnson & Williams, 2003).

Em condições de água turva, o OTV se torna inadequado, devendo ser substituído pelo ATV. Maiores comparações sobre o funcionamento e os resultados obtidos através das perfilagens OTV e ATV podem ser encontradas no trabalho de Williams & Johnson, 2004.

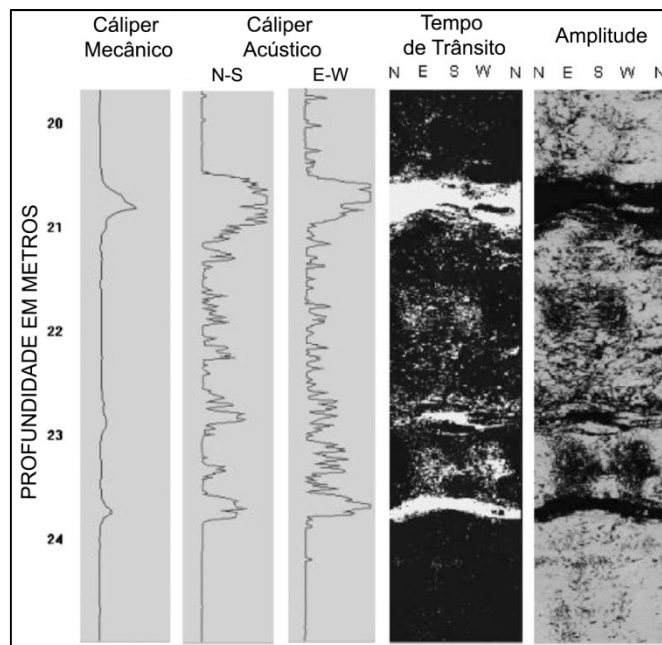


Figura 16 - Perfis de cáliper mecânico, acústico e imagens do tempo de trânsito e da amplitude de ondas refletidas obtidas através do imageamento acústico (adaptado de Williams & Johnson, 2004)

Segundo Paillet & Ollila (1994), as imagens do ATV promovem uma indicação qualitativa da abertura das fraturas, pois fraturas com maior abertura supostamente ocorrem como feições maiores e mais escuras. Porém, assim como ocorre no cáliper, a espessura medida através da imagem é influenciada pela perfuração do poço, uma vez que em locais onde a rocha é menos resistente (coincidentes com a presença de fraturas) ocorre alargamento das paredes do poço e, quando há alteração ao longo da fratura, essa influência é ainda maior. Os autores sugerem que informações qualitativas a respeito da abertura da fratura, obtidas através do ATV, sejam traduzidas em informações quantitativas, através de pontuações que podem ser atribuídas às feições indicativas de fluxo (e.g. espessura da fratura na

imagem, grau de conectividade entre fraturas, etc), apesar da dificuldade em quantificá-las. O mesmo procedimento também pode ser adotado para as perfilagens OTV. Apesar de uma pequena porção das fraturas (5 a 10%) identificadas como possivelmente transmissivas através desse método de pontuação (alta pontuação) serem identificadas como fraturas hidraulicamente ativas através do *flowmeter*, os mesmos autores não excluem a possibilidade de tais fraturas com alta pontuação serem permeáveis apenas localmente, e atribuem a ausência de fluxo ao fato de, possivelmente, essas fraturas não estarem conectadas com o principal sistema de fratura por onde ocorre o fluxo.

Neste estudo, as fraturas foram classificadas com relação à espessura aparente, a partir da observação em conjunto das seguintes feições: variação do diâmetro do poço indicado pelos calípers acústico e mecânico, espessura do traço da fratura nas imagens OTV e ATV e cor alaranjada de alteração (indicador de atividade hidráulica) observada através da perfilagem OTV. Com base nestes parâmetros, foram determinados quatro tipos de espessura aparente: estreita, pouco espessa, espessa e muito espessa. Os perfis obtidos através destas perfilagens (calíper acústico e mecânico, OTV e ATV) e as fraturas classificadas de acordo com a espessura aparente podem ser visualizados no anexo 2.

Ainda através das perfilagens OTV e ATV, procurou-se identificar quais fraturas estão preenchidas e, também, aquelas paralelas à foliação. Para as últimas, foram feitos estereogramas e histogramas de direção e mergulho, com a finalidade de caracterizar a foliação e as fraturas condicionadas pela reativação dessa estrutura. Este resultado é apresentado no item 4.4.2. No anexo em questão, também se pode visualizar quais fraturas foram consideradas paralelas à foliação.

3.4.4 Perfilagem de fluxo de água (*flowmeter*)

A medição do sentido e da velocidade do fluxo vertical de água no interior de poços pode ser realizada por um medidor de fluxo, conhecido como *flowmeter*. Atualmente, existem três tipos diferentes de *flowmeter*: mecânico, a laser Doppler e de pulso de calor (*Heat Pulse Flowmeter - HPFM*), sendo os dois últimos de maior precisão (Geological Survey U.S., 2007). Neste trabalho, foi utilizado o HPFM, cujo mecanismo foi desenvolvido por Hess (1986).

O HPFM realiza medidas de fluxo axial ao longo do poço, em profundidades discretas, através do tempo que uma pequena quantidade de água aquecida leva para percorrer da grade de calor (onde se deu o aquecimento) até o termistor, o qual detecta a chegada da água (Hess, 1986). Existem dois termistores posicionados em locais distintos na sonda, acima e abaixo da grade de calor, para detectar o sentido do deslocamento da água (ascendente ou descendente). O tempo de deslocamento é inversamente proporcional à velocidade do fluxo ao longo do poço (equação 3); portanto, quanto maior o tempo decorrido, menor será a velocidade do fluxo.

$$V = [-1,5156 \ln(t)] + 5,2502 \quad (\text{Equação 3})$$

A leitura da velocidade é feita através de um gráfico de diferencial de temperatura *versus* tempo (figura 17). Curvas com inflexão positiva indicam fluxo ascendente, e curvas com inflexão negativa indicam fluxo descendente. O equipamento detecta uma velocidade mínima de fluxo em torno de 0,001 l/s (Hess & Paillet, 1990).

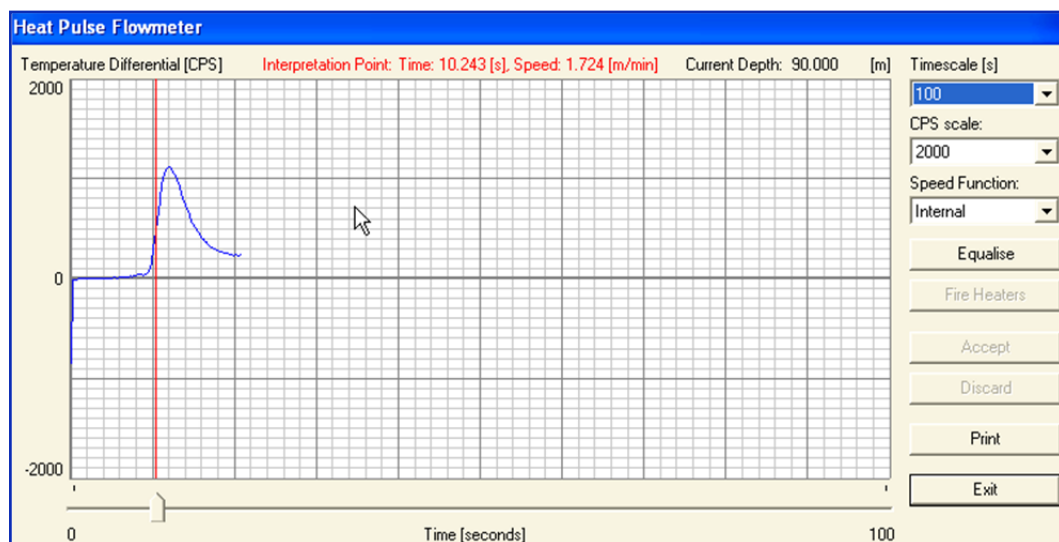


Figura 17 - Reprodução do gráfico apresentado pelo software de aquisição de dados obtidos com o Heat Pulse Flowmeter (o eixo x indica o tempo transcorrido em segundos e o eixo y indica o diferencial de temperatura em contagens por segundo - CPS)

Para que ocorra fluxo no interior do poço, necessita-se tanto da presença de fraturas transmissivas interceptando-o, quanto de diferenças de cargas hidráulicas para conduzir o fluxo (Paillet, 1995). Sendo assim, a detecção de fluxo através da utilização do *flowmeter* em condições ambiente (sem bombeamento) indica que,

naturalmente, ocorrem diferenças de cargas hidráulicas no interior do poço. Entretanto, em tais condições, é possível que algumas fraturas hidráulicamente condutivas não sejam identificadas (Paillet *et al.*, 1994). Por isso, para garantir que todas as fraturas permeáveis sejam identificadas, a maioria dos estudos que utilizam o *flowmeter*, realizam perfilagens tanto em condições naturais como em bombeamento. Neste estudo, porém, as perfilagens foram executadas somente em condições naturais.

Visando a otimização do tempo na perfilagem com o *flowmeter*, é fundamental realizar uma avaliação prévia sobre as porções mais fraturadas do poço e, principalmente, sobre quais fraturas ou zonas de fraturas são possivelmente mais abertas, o que está relacionado com a classificação de espessura aparente obtida por meio dos resultados das perfilagens OTV, ATV e cáliber, conforme descrito no item anterior. Depois de identificado determinado intervalo de interesse, é necessário efetuar uma leitura acima e outra abaixo do trecho em questão, para verificar se ocorre alguma variação no fluxo.

No presente trabalho, foram efetuadas pelo menos quatro leituras em cada ponto de medida, devido à variação de valores normalmente obtidos. Para se obter um valor representativo, calculou-se a média da velocidade de fluxo das três últimas leituras, excluindo a primeira, já que esta, geralmente, apresenta um valor discrepante em relação às demais. Em algumas situações foram realizadas mais de quatro leituras; nestes casos, além da primeira medida, também foram excluídas aquelas consideradas discordantes.

Durante a utilização do HPFM, verificou-se que distúrbios externos podem dificultar a obtenção das leituras com este equipamento. No caso observado, esse distúrbio consistiu num intenso tráfego de veículos pesados (caminhões e ônibus) muito próximo ao poço perfilado, e que, provalvemente, provocou certa trepidação e esta foi transferida para o equipamento.

3.5 Processamento de Dados Estruturais

3.5.1 Correção de Viés de Orientação

O levantamento de fraturas realizado em scanlines de afloramentos ou túneis, ou ao longo de testemunhos de furos de sondagens e imageamento de poços, na

maior parte das vezes, vem acompanhado de um viés originado pelo ângulo entre a linha de amostragem e a atitude média do grupo de fraturas. Este é chamado de viés de orientação (Terzaghi, 1965) e ocorre, principalmente, quando as linhas de amostragem não possuem orientações suficientemente variadas e, conseqüentemente, a proporção das fraturas de diferentes grupos não é adequadamente representada. Um exemplo simples é a coleta de dados em sondagens verticais, que favorece a amostragem de fraturas com baixo ângulo de mergulho em relação às fraturas de mergulhos elevados.

Uma amostragem não representativa dos grupos de fraturas que seccionam um maciço fraturado é prejudicial tanto para a definição dos próprios grupos, quanto para o cálculo de espaçamento e de densidade de fraturas, realizado individualmente para cada grupo.

Para o caso do levantamento feito ao longo de poços, o viés de orientação geralmente pode ser reduzido a um nível aceitável utilizando três furos de sondagens inclinados, cujos traços sejam orientados com um ângulo de 120° entre si e com mergulho de 45° (Terzaghi 1965). Desse modo, qualquer que seja a orientação das fraturas de um mesmo grupo, quando abundantes, serão interceptadas com um ângulo maior que 30° por pelo menos um dos furos de sondagens. Sendo assim, Terzaghi (1965) recomenda a não utilização de dados de fraturas que façam um ângulo menor que 20° ou 30° com a direção da sondagem, a fim de garantir uma boa base de dados para o cálculo de espaçamento e de densidade de um grupo de fratura.

Uma limitação importante do presente trabalho é que todos os poços utilizados para o levantamento de dados estruturais são verticais, havendo, portanto, uma sub-amostragem das fraturas sub-verticais, as quais são observadas com frequência em afloramentos. Esta limitação é parcialmente minimizada pela extrapolação dos resultados obtidos no levantamento de fraturas ao longo de *scanlines* horizontais de direção variável realizadas em afloramentos de pedreiras.

Terzaghi (1965) elaborou um método de correção de densidade de fraturas através de projeção polar em estereogramas. Este método se baseia na relação entre o espaçamento aparente (d') e o espaçamento verdadeiro (d) das fraturas de um grupo, causada pelo ângulo (α) entre um furo de sondagem orientado e as fraturas interceptadas, conforme ilustrado na figura 18. Partindo deste princípio, a autora corrige o número de fraturas ($N\alpha$) presentes ao longo de uma sondagem de

comprimento L , e plota no estereograma o número de fraturas (N_{90}) que seriam interceptadas caso a mesma sondagem de comprimento L fosse perpendicular às fraturas. De acordo com os cálculos apresentados na figura 18, o número de fraturas corrigido (N_{90}) é obtido atribuindo um peso igual a $1/\text{sen}\alpha$ ao número de fraturas encontradas ($N\alpha$).

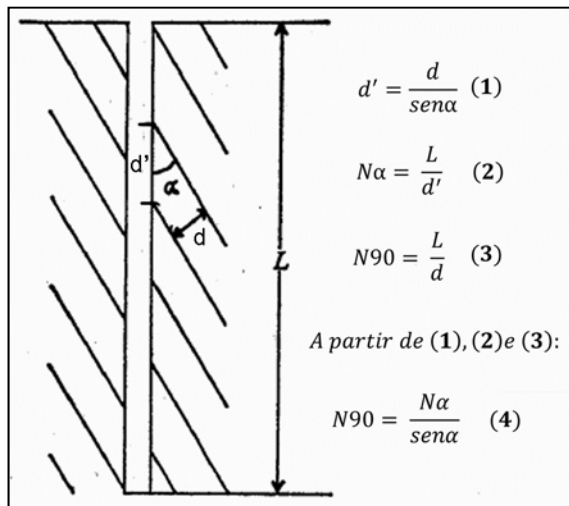


Figura 18 - Ilustração da relação angular entre o espaçamento aparente (d') e o espaçamento verdadeiro (d) de fraturas de um mesmo grupo, e os cálculos envolvidos na correção da densidade de fraturas (modificado de Terzaghi, 1965)

Tal método foi utilizado para gerar estereogramas com contornos corrigidos com relação às densidades relativas dos vários grupos de fraturas, auxiliando na identificação dos principais grupos de fraturas presentes, nos dados coletados em poços e em afloramentos (ver item 3.5.2). Para a realização desta correção, adotou-se uma adaptação desenvolvida por Pino (2012), que possibilita o uso de *softwares* de estereogramas, já que o procedimento original era feito de forma manual. A cada fratura, com α maior que 20° , é atribuído um peso igual a $1/\text{sen}\alpha$ (conforme explicado acima), só que multiplicado por dez, para torná-lo um número inteiro; o valor resultante será a quantidade de cada fratura a ser plotada no estereograma. Com este novo peso, o N_{90} resultante será dez vezes maior do que o N_{90} verdadeiro, mas tal fato não afeta a distribuição de densidade, pois esta é uma porcentagem do total de fraturas plotadas.

Com relação às fraturas com α menor que 20° , foi atribuído peso igual a zero para os dados de afloramentos; porém, para os dados de poços foi atribuído o mesmo peso, $1/\text{sen}\alpha$, adotado para as fraturas com α maior que 20° . Isso ocorreu, porque verificou-se que nos dados de poços as fraturas com α menor que 20° são aquelas de mergulho igual ou superior a 70° , ou seja, são subparalelas aos poços e

possuem menor chance de serem amostradas. Então, julgou-se importante considerar o peso obtido pela correção, para diminuir o efeito da subamostragem de tais fraturas. Contudo, isso só foi possível, porque a maioria das fraturas com α menor que 20° possuíam valor de α superior a 10° e, conseqüentemente, os pesos obtidos para essas fraturas não causaram erros extremamente elevados nas densidades relativas entre os diversos grupos de fraturas; diferente do que se observou nos dados de afloramentos, onde ocorreram muitas fraturas com α próximo de zero. No anexo 3 são apresentados, para efeito de comparação, os estereogramas dos dados de poços e de afloramentos obtidos (1) sem corrigir o contorno de densidade de fraturas; (2) com os contornos de densidade corrigidos, utilizando peso igual a zero para as fraturas com α menor que 20° ; e (3) com os contornos de densidade corrigidos, utilizando o peso $1/\text{sen}\alpha$ para todas as fraturas, independente do seu ângulo com a *scanline* ou com o poço.

Sendo os poços verticais, o ângulo α entre uma determinada fratura e o poço, pode ser diretamente obtido subtraindo o ângulo de mergulho da fratura do ângulo de mergulho do poço ($90^\circ - \text{ângulo de mergulho da fratura}$). No caso das scanlines, o ângulo entre uma determinada fratura e a *scanline* pode ser obtido indiretamente utilizando a lei dos cossenos (equação 4), aplicada por Rouleau & Gale (1985) e Fernandes & Rouleau (2008). A lei em questão fornece o ângulo entre o polo da fratura e a *scanline* (θ); portanto, α e θ são complementares. Os membros que compõem a equação 4 estão indicados abaixo; μ e ϑ correspondem, respectivamente, ao sentido do caimento (0° a 360°) e ao ângulo do caimento (0° a 90°) do polo médio do grupo de fraturas, e μ' e ϑ' correspondem ao sentido do caimento e ao ângulo do caimento da linha de observação (*scanline*). A tabela com as fórmulas utilizadas para calcular os ângulos θ e α , o peso $1/\text{sen}\alpha$ e o N90 multiplicado por 10 (quantidade de cada fratura a ser plotada no estereograma) também consta no anexo 3.

$$\cos \theta = p \cdot p' + q \cdot q' + r \cdot r' \quad (\text{Equação 4})$$

$$p = \cos \mu \cdot \cos \vartheta \quad q = \sin \mu \cdot \cos \vartheta \quad r = \sin \vartheta$$

$$p' = \cos \mu' \cdot \cos \vartheta' \quad q' = \sin \mu' \cdot \cos \vartheta' \quad r' = \sin \vartheta'$$

O método proposto por Terzaghi (1965), além de permitir a correção das densidades relativas, conforme descrito acima, possibilita a obtenção de valores numéricos da densidade e do espaçamento. Para o cálculo da densidade é necessário somar os valores de N90 verdadeiro (não multiplicado por 10) obtidos para todas as fraturas de um mesmo grupo e dividir o resultado pelo comprimento da linha de observação. O espaçamento corresponde ao valor inverso da densidade. Outro método para corrigir a densidade e, conseqüentemente, o espaçamento de fraturas é proposto por Kiraly (1970) e também foi utilizado por Rouleau & Gale (1985) e Fernandes & Rouleau (2008). Nele, obtém-se o comprimento corrigido (L') da linha de observação (L) através da equação 5, para um grupo específico de fraturas (sendo que $\cos\theta$ é obtido através da lei dos cossenos). Assim, a correção da densidade para o grupo em questão será igual ao número de fraturas presentes no determinado grupo dividido pelo comprimento corrigido.

$$L' = L . \cos \theta \quad (\text{Equação 5})$$

O fato do método de Terzaghi (1965) corrigir o número de fraturas e o método de Kiraly (1970) corrigir o comprimento através do mesmo fator de correção (seno ou $\cos\theta$, que são equivalentes, pois α e θ são complementares), conceitualmente, produz o mesmo resultado na correção do espaçamento e da densidade de fraturas de um mesmo grupo, amostrados numa determinada linha orientada. A principal diferença entre os métodos é que a correção de Terzaghi (1965) é primeiro aplicada individualmente para cada fratura, enquanto no método de Kiraly (1970), a correção é aplicada diretamente para todas as fraturas do grupo.

No presente trabalho, ambos os métodos foram aplicados para o cálculo da densidade e do espaçamento e os resultados serão apresentados e discutidos no item 4.3, para os dados de afloramento, e no item 4.4, para os dados de poços. Juntamente com estes resultados, constam o número de fraturas corrigido (N90), que corresponde ao número de fraturas de determinado grupo de fratura, o comprimento verdadeiro da linha de observação (L) e o seu comprimento corrigido (L').

É importante salientar que o cálculo de densidade e de espaçamento de fraturas dos diferentes grupos possui uma etapa a mais nos dados de afloramentos em relação aos dados de poços. Enquanto, cada poço corresponde a uma única

linha vertical de observação, em cada afloramento foi realizado levantamento ao longo de linhas horizontais de direções variadas (*scanlines*). Sendo assim, para cada grupo é preciso avaliar a quantidade de fraturas observada por *scanline*. Nessa avaliação, as fraturas constituintes de zonas de fraturas foram consideradas como uma fratura única, pois elas possuem espaçamento e densidade diferentes daqueles entre fraturas isoladas.

Na tabela 3, consta o número de fraturas de cada grupo encontrado em cada *scanline*, o ângulo entre a atitude média dos grupos de fraturas e as *scanlines* e, finalmente, a identificação dos grupos para os quais foram calculados os valores de densidade e espaçamento, ou seja, que possuem ao menos duas fraturas por *scanline* e cujo α é maior do que 20° . Uma última consideração deve ser feita com relação aos dados de poços. Apesar de terem sido consideradas as fraturas com α menor que 20° na correção das densidades relativas nos estereogramas, a densidade e o espaçamento desses grupos de fraturas não foram calculados, uma vez que tais fraturas aumentam a incerteza dos resultados.

Tabela 3 - Quantificação das fraturas de cada grupo observadas por *scanline* e definição dos grupos para os quais foram calculados o espaçamento e a densidade de fraturas; em vermelho estão os grupos que não foram considerados por apresentarem α menor que 20°

Número de fraturas por grupo observadas em cada scanline * Grupos com zonas de fratura						
GS-1						
Grupo	SL-1	SL-2	SL-3	SL-4	SL-5	SL-6
1	6*	3	8*	4*	5*	6
2	1	4	2	-	6	-
3	2	-	1	-	3	2
GS-2						
Grupo	SL-1	SL-2	SL-3	SL-4	SL-5	SL-6
1	-	1	-	3*	-	2
2	1	1	2	2	-	1
3	-	-	-	-	-	1
4	-	-	-	-	-	2
5	-	-	2	-	-	2
GS-3						
Grupo	SL-1	SL-2	SL-3	SL-4	SL-5	SL-6
1	-	6	-	1	3*	1
2	4	2	6	1	-	3*
3	3	-	-	1	5*	-
Grupo	SL-7	SL-8	SL-9	SL-10	SL-11	
1	6*	4*	3*	-	2*	
2	2*	4	-	2	2	
3	1	-	-	-	1	
GS-4						
Grupo	SL-1	SL-2	SL-3	SL-4	SL-5	SL-6
1	9*	6	3*	11	9	
2	5	-	5	3	9	
3	2	-	1	5	1	

Valores de α entre a atitude média de cada grupo e cada scanline						
GS-1						
Grupo	SL-1	SL-2	SL-3	SL-4	SL-5	SL-6
1	33	54	19	21	20	76
2	1	16	2	-	2	-
3	31	-	45	-	44	40
GS-2						
Grupo	SL-1	SL-2	SL-3	SL-4	SL-5	SL-6
1	-	25	-	1	-	6
2	57	35	16	0	-	8
3	-	-	-	-	-	34
4	-	-	-	-	-	41
5	-	-	42	-	-	43
GS-3						
Grupo	SL-1	SL-2	SL-3	SL-4	SL-5	SL-6
1	-	14	-	79	5	60
2	26	54	14	21	-	4
3	34	-	-	21	65	-
Grupo	SL-7	SL-8	SL-9	SL-10	SL-11	
1	31	49	50	-	45	
2	21	57	-	11	10	
3	29	-	-	-	15	
GS-4						
Grupo	SL-1	SL-2	SL-3	SL-4	SL-5	SL-6
1	70	3	59	59	83	
2	6	-	43	43	14	
3	52	-	42	42	54	

Número de fraturas e grupos de fraturas utilizadas no cálculo de espaçamento e densidade						
GS-1						
Grupo	SL-1	SL-2	SL-3	SL-4	SL-5	SL-6
1	6*	3	-	4*	5*	6
2	-	-	-	-	-	-
3	2	-	-	-	3	2
GS-2						
Grupo	SL-1	SL-2	SL-3	SL-4	SL-5	SL-6
1	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	2
5	-	-	2	-	-	2
GS-3						
Grupo	SL-1	SL-2	SL-3	SL-4	SL-5	SL-6
1	-	-	-	-	-	-
2	4	2	-	-	-	-
3	3	-	-	-	5	-
Grupo	SL-7	SL-8	SL-9	SL-10	SL-11	
1	6*	4*	3*	-	2*	
2	-	4	-	-	-	
3	-	-	-	-	-	
GS-4						
Grupo	SL-1	SL-2	SL-3	SL-4	SL-5	SL-6
1	9*	-	3*	11	9	
2	-	-	5	3	-	
3	2	-	-	5	-	

3.5.2 Caracterização dos Principais Grupos de Fraturas e Análise Tectônica

Neste trabalho, os dados de atitudes de fratura correspondem ao rumo do mergulho e ao ângulo de mergulho (notação da bússola Clar), no entanto, ao longo do texto é utilizada a notação de quadrante por ser mais facilmente apreendida. Os polos das fraturas foram plotados em estereogramas elaborados, individualmente, para cada afloramento e cada poço de estudo, através do *software* DIPS v.5.1; os estereogramas referentes aos afloramentos foram ainda separados conforme o tipo de dado, se coletado em *scanlines* ou em pontos de observação. Cada estereograma foi utilizado para a identificação dos principais grupos de fraturas. A fim de diminuir a subjetividade na identificação de tais grupos, fez-se uso dos contornos de densidade corrigidos pelo método de Terzaghi (1965). No caso dos dados de afloramentos, a identificação dos grupos de fraturas foi baseada, essencialmente, nos dados coletados em *scanlines*, pois, além dos dados coletados em observações pontuais ocorrerem em menor quantidade, nestes, a correção de densidade não é aplicável. Ainda com relação aos dados de afloramentos, foram elaborados estereogramas, separadamente para cada afloramento, através do *software* OpenStereo v.0.1.2, contendo os círculos máximos das fraturas constituintes dos principais grupos identificados (tanto aquelas amostradas em *scanlines*, quanto em pontos de observação).

Os dados de fraturas obtidos nas perfilagens foram, também, analisados em relação à porcentagem de fraturas com a profundidade (histograma) e à distribuição das orientações e dos principais grupos de fraturas, através do *software* FracMan v.7.4. Nesta última, geram-se os contornos de densidades, para identificar os polos médios de cada grupo de fratura, e então, a partir de uma ferramenta denominada ISIS (Interactive Sets Identification System), são redesignadas as fraturas constituintes de cada grupo por meio de repetidas análises de probabilidades. Esta análise é fundamental para realizar a modelagem 3D através do FracMan, pois ela fornece alguns dos principais parâmetros necessários (direção e mergulho do polo médio e fator K de dispersão). Contudo, neste trabalho, tal modelagem não foi realizada e os resultados obtidos foram utilizados para comparar com os grupos de fraturas identificados manualmente.

Todas as informações acerca das fraturas dos principais grupos foram detalhadamente examinadas, a fim de determinar as principais características de cada um desses grupos. Algumas dessas características foram definidas tanto para as fraturas amostradas nos afloramentos, quanto para as fraturas obtidas através das perfilagens. Estas são: espaçamento/densidade, ocorrência de zonas de fraturas, relação com estruturas pré-existentes (e.g. foliação, veio, etc) e presença de feições indicativas de fluxo (e.g. porções alteradas da rocha, escoamento, etc). Entretanto, outros aspectos importantes só puderam ser visualizados em afloramentos, são eles: comprimento, que também pode ser comprometido devido ao tamanho do afloramento; feições superficiais, como plumas, “ribs”, estrias, indicadores cinemáticos, preenchimento mineral, etc; e terminações entre fraturas, que evidenciam a idade relativa entre os grupos de fraturas.

As informações obtidas exclusivamente em afloramentos permitem, ainda, que seja realizada uma análise tectônica, que, conforme discutido na revisão de trabalhos anteriores, pode influir na determinação dos grupos de fraturas mais transmissivas. Os principais resultados esperados através da análise tectônica seguem listados abaixo:

- Determinação do modo de propagação e da orientação dos esforços associados aos grupos de fraturas identificados, através da análise das direções e dos ângulos de mergulho das fraturas, presença de pares conjugados, indicadores de sentido de cisalhamento, feições de pluma, etc.

- Determinação da idade relativa dos grupos de fraturas e superposição de campos de esforços tectônicos, principalmente, por meio da observação de terminações e interações entre fraturas e também através da comparação com o que está descrito na literatura, em termos de tectônica cenozóica para a região de estudo e arredores.

Na realização de tal análise tectônica, os dados de estrias e seus respectivos planos de falhas, bem como sentidos de movimento, quando presentes, foram plotados em estereogramas através do *software* Open Stereo v.0.1.2.

Os resultados obtidos por meio da análise tectônica e da comparação com a literatura foram, também, avaliados com relação às feições indicativas de fluxo observadas em campo - como alteração superficial de cor ocre, presença de rocha alterada junto à fratura, ocorrência de vegetação e de fluxo de água - para verificar

se existem associações entre os grupos de fraturas mais transmissivos e a orientação dos principais esforços neotectônicos, com ênfase no campo de esforços atual.

Pode-se considerar, portanto, que os principais resultados esperados através do tratamento estrutural em questão foram: (1) caracterizar o sistema de fraturas do maciço estudado, ou seja, identificar quais são os principais grupos de fraturas e seus parâmetros geométricos; e (2) identificar quais desses grupos são mais favoráveis ao fluxo de água subterrânea e, possivelmente, de contaminantes.

3.6 Processamento de Dados de Fluxo

Os dados disponíveis para a análise de fluxo correspondem aos dados de velocidade de fluxo obtidos através do HPFM nos quatro poços perfilados neste trabalho, identificados como: 255, 256, 1204 e 1346. Os principais resultados esperados através dessa análise consistem na determinação dos principais intervalos do poço onde há entrada ou saída de água e, conseqüentemente, na identificação das fraturas mais favoráveis ao fluxo.

Para chegar a esses resultados, primeiramente, o valor médio da velocidade de fluxo (em m/min), obtida em cada profundidade analisada, foi convertido em vazão (em m³/h), através da multiplicação da velocidade pela área da seção do poço. Considerando que existem diferenças de velocidade de fluxo ao longo da seção de um poço, pois próximo às paredes do poço o fluxo é menor do que na sua porção central, as velocidades de fluxo obtidas através do *flowmeter* podem ser consideradas como as velocidade máximas, já que as medidas são realizadas no centro do poço. Nestas condições, sendo o fluxo unidimensional, a velocidade média é tida como 1/2 da vazão máxima (Reis, 2008); portanto, considerou-se que a vazão verdadeira corresponde à metade da vazão obtida pelo *flowmeter*. Em seguida, para quantificar o fluxo que entra ou sai através de cada intervalo analisado, foi calculada a diferença de vazão entre um ponto de medida e o ponto de medida imediatamente abaixo. Quanto maior o módulo dessa diferença, maior será o fluxo transmitido pelas fraturas do intervalo em questão. Todos os cálculos citados foram realizados através de uma tabela no Excel, segundo o modelo abaixo (tabela 4).

Tabela 4 - Modelo da tabela utilizada na conversão dos valores de velocidade, obtidos pelo *flowmeter*, em vazão e no cálculo de diferença de vazão entre dois pontos de medidas consecutivos

Prof.	Vel.	Diam.	Diam.	Raio	A	Q	Q	Q/3	Dif. Q
[m]	[m/min]	[pol.]	[m]	[m]	[m ²]	[m ³ /min]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]
A1	B1	C1	$D1 = \frac{C1 * 2,54}{100}$	$E1 = D1/2$	$F1 = \pi E1^2$	$G1 = B1 * F1$	$H1 = G1 * 60$	$I1 = H1/3$	$J1 = H1 - H2$

As fraturas presentes nos intervalos entre uma medida e outra foram classificadas a partir dos valores de diferença de vazão, da seguinte maneira:

- Entre 0,00 e 0,09 m³/h, sem vazão significativa;
- Entre 0,10 e 0,19 m³/h, com vazão baixa;
- Entre 0,20 e 0,29 m³/h, com vazão moderada;
- Entre 0,30 e 0,39 m³/h, com vazão alta;
- Maior ou igual a 0,40 m³/h, com vazão muito alta;

É importante salientar que, no presente trabalho, dificilmente havia apenas uma única fratura no intervalo analisado; na maioria das vezes, havia várias fraturas, seja de atitudes semelhantes ou diferentes. Nesta situação, conforme constatado por Paillet & Ollila (1994), existe uma dificuldade na determinação das fraturas verdadeiramente responsáveis pela entrada ou saída de água. Os autores consideram que, supostamente, o fluxo ocorre pela fratura com maior espessura aparente e com feições indicativas de fluxo (tais como alteração) e eles também sugerem que a direção do fluxo, em grande escala, é orientada preferencialmente conforme a direção média das fraturas. Sendo assim, para a identificação das fraturas com maior probabilidade de fluxo num intervalo com várias fraturas, utilizou-se a classificação de espessura aparente (estreita, pouco espessa, espessa e muito espessa) obtida através da análise das perfilagens ATV, OTV e cáliper, descrita no item 3.4.3.

Na tabela 5, é possível verificar um exemplo de como foi feita essa determinação das fraturas mais transmissivas para um intervalo entre duas medidas com o *flowmeter* no poço 256. Neste intervalo, verifica-se que houve uma perda de 0,12 m³/h entre as medidas realizadas a 86,0 e 91,0 m de profundidade (lembrando que o fluxo é ascendente). Essa diminuição de vazão é atribuída à saída de fluxo através de fraturas presentes neste intervalo, com maior probabilidade de serem aquelas classificadas com alguma espessura (pouco espessa, espessa ou muito espessa) em relação às fraturas estreitas. De acordo com a classificação dos

valores de vazão (acima), tais fraturas foram classificadas como de baixa vazão. É importante salientar que o valor de vazão utilizado para a classificação (no caso, 0,12 m³/h) corresponde ao valor máximo de vazão que o conjunto de fraturas do intervalo em questão fornecem; deste modo, os resultados obtidos são mais qualitativos, onde foram identificadas fraturas com maior ou menor vazão.

Após serem classificadas, os polos das fraturas foram plotados em estereogramas através do *software* DIPS, a fim de analisar se existe alguma relação entre as fraturas mais transmissivas e determinados grupos de fraturas.

Tabela 5 - Exemplo da classificação das fraturas em relação à vazão, para um intervalo entre duas medidas com o flowmeter no poço 256, utilizando a classificação de espessura aparente no auxílio determinação das fraturas mais transmissivas

Prof	Dir Merg	Merg	Grupo	Q (m ³ /h)	Dif Q (m ³ /h)	Fluxo	Espessura
86,0				0,07	-0,12		
86,8	87	42	1			vazão insignificante	estreita
87,1	101	27	1			vazão insignificante	estreita
87,2	101	28	1			vazão insignificante	estreita
87,2	101	27	1			vazão insignificante	estreita
87,3	102	26	1			vazão insignificante	estreita
87,4	100	21	1			vazão insignificante	estreita
87,5	90	25	1			vazão insignificante	estreita
87,7	76	24	1			vazão insignificante	estreita
88,0	211	21				vazão baixa	pco espes.
88,3	78	40	1			vazão baixa	pco espes.
88,5	57	36	1			vazão baixa	pco espes.
88,7	270	16				vazão baixa	pco espes.
89,0	85	59	1			vazão baixa	pco espes.
89,2	86	33	1			vazão baixa	pco espes.
89,4	355	6	1			vazão baixa	pco espes.
89,7	341	22	1			vazão baixa	pco espes.
90,2	57	46	1			vazão baixa	pco espes.
90,4	324	11	1			vazão baixa	pco espes.
91,0				0,19			

3.7 Modelo Conceitual de Circulação de Água Subterrânea

Para a elaboração do modelo conceitual de circulação de água subterrânea do Aquífero Cristalino da região de Jurubatuba (município de São Paulo) dois

procedimentos são imprescindíveis: (1) a caracterização da rede de fraturas do maciço como um todo - principalmente, quando também há interesse na investigação do fluxo de contaminantes não dissolvidos - e (2) a identificação das fraturas mais importantes para o fluxo.

Conforme apresentado no item Materiais e Métodos, foi realizado um extenso levantamento de dados em afloramentos (pedreiras), fora da região de Jurubatuba, mas no mesmo contexto geológico-estrutural. Sendo assim, para caracterizar a rede de fraturas, primeiramente, foram comparadas as características geométricas (principalmente, em relação às orientações e espaçamento) dos grupos de fraturas identificados nos diversos afloramentos com aqueles observados nas perfilagens OTV, estas realizadas propriamente na área de estudo. Nesta comparação, é esperado que os dados de afloramentos complementem, principalmente, as características dos grupos subverticais, que são subamostrados na perfilagem de poços verticais.

Quanto à identificação das fraturas mais favoráveis ao fluxo, a perfilagem com o *flowmeter* consiste na principal ferramenta para essa finalidade, já que mede diretamente as variações da velocidade do fluxo no interior do poço, causadas pelas fraturas que o interceptam. Novamente, com a finalidade de complementar tais informações, foram comparados os resultados das feições diagnósticas de fluxo (principalmente, cor de alteração ocre e rocha alterada) obtidos para os grupos de fraturas estudados nos afloramentos.

Tendo sido efetuados esses procedimentos, é possível, então, elaborar o modelo conceitual através de uma representação 3D do maciço e de suas fraturas, transmissivas e não transmissivas. É bastante interessante realizar esta representação através de *softwares* de modelagem computacional, como o FracMan; infelizmente, apesar da sua licença ter estado disponível, não foi possível utilizá-lo com esta finalidade neste trabalho.

4. RESULTADOS

4.1 Geologia da Área de Estudo

O mapa geológico abaixo (figura 19) indica quais são os litotipos presentes em cada afloramento estudado. De acordo com o mapa, a pedreira GS-1 se situa sobre um corpo gnáissico, a pedreira GS-2 ocorre no contato entre as unidades gnáissica e xistosa e as pedreiras GS-3 e GS-4 se situam sobre corpos de granitóides. O único caso em que a rocha observada em campo não corresponde àquela indicada pelo mapa é o da GS-2, onde foi encontrado um granito foliado, provavelmente, de escala não mapeável.

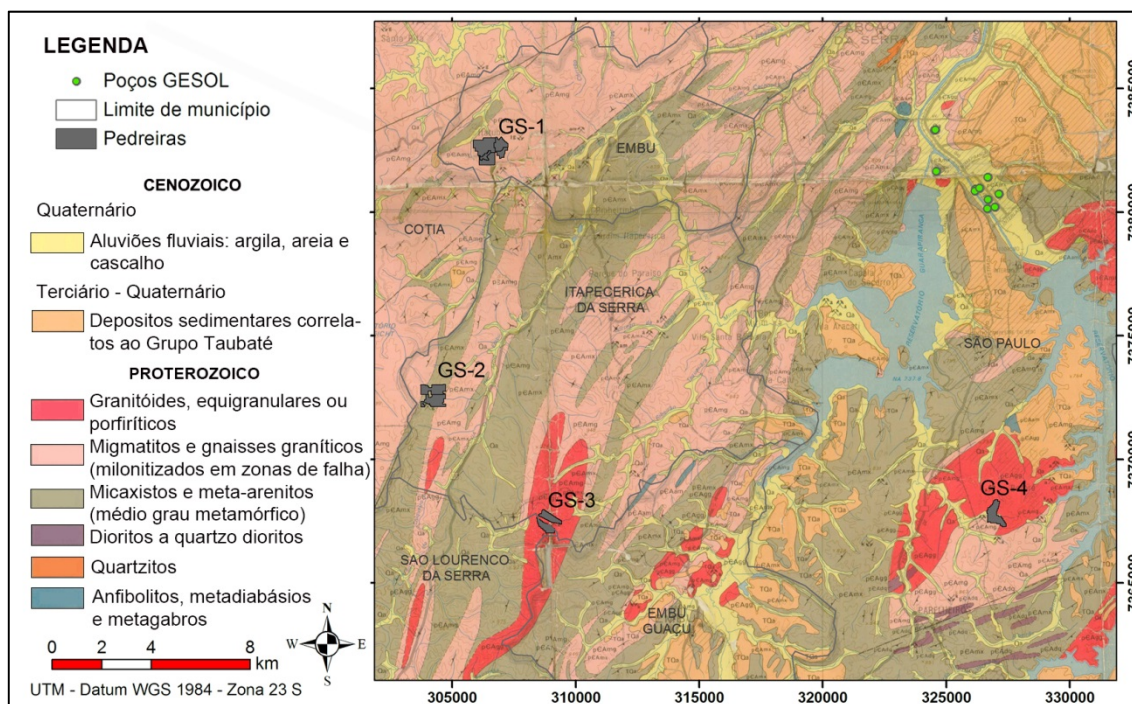


Figura 19 - Mapa geológico com a localização das pedreiras visitadas e dos poços da área de estudo (adaptado de Coutinho, 1980)

Na pedreira GS-1 aflora um biotita gnaiss de coloração cinza claro, com granulação variável (ora essencialmente fina, ora essencialmente média) e composição predominantemente granitóide. Possui bandamentos composicionais, com porções mais máficas de granulação fina e porções pegmatíticas. A foliação é plano-linear, ou seja, possui forte estiramento mineral numa direção preferencial (figura 20-a), e está dobrada (dobras abertas com eixo horizontal). Os dados de foliação foram plotados em estereograma (figura 21) e, apesar de restritos, verifica-

se que a foliação possui direção NE com mergulho médio a alto para NW e SE (e.g. 40/74 e 32/54).

A rocha da pedreira GS-2 é um biotita granito porfírico, foliado, de coloração cinza, com granulação média a fina e fenocristais de feldspatos com até 5 cm (figura 20-b). Em toda a pedreira ocorrem veios quartzo-feldspáticos de espessura centimétrica a decimétrica, com orientação em torno de N-S e mergulho médio (e.g. 354/54, 8/75, 0/55). Assim como na pedreira de gnaiss, a foliação possui direção NE; mas, o seu ângulo de mergulho é essencialmente médio com caimento para NW ($\sim 50^\circ$; figura 21).

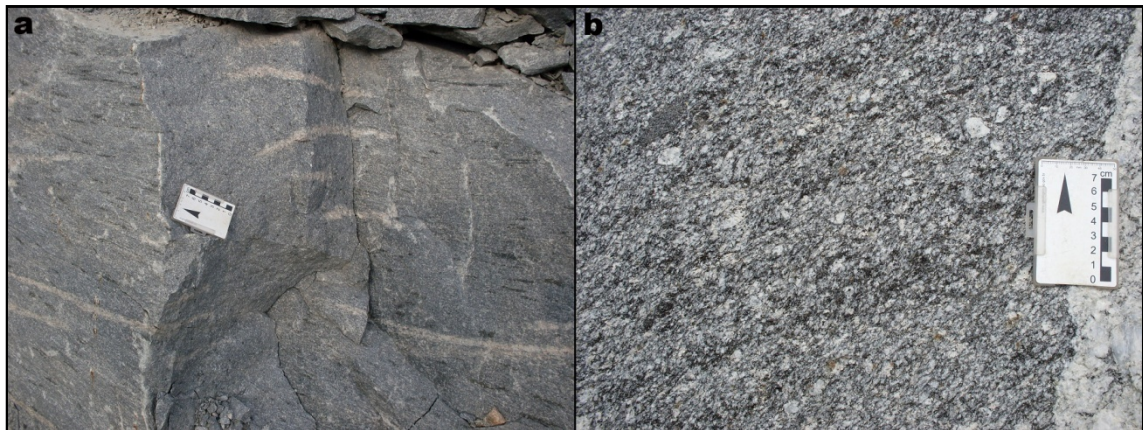


Figura 20 - (a) gnaiss da pedreira GS-1, exibindo estiramento mineral restrito à face a esquerda da foto; (b) detalhe do granito foliado da pedreira GS-2, com veio de quartzo à direita da foto

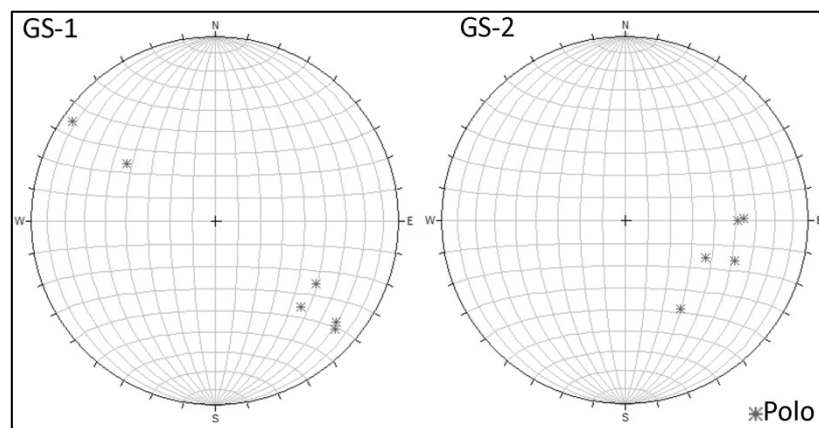


Figura 21 - Polos das medidas de foliação das pedreiras GS-1 e GS-2

Quanto às pedreiras GS-3 e GS-4, ambas apresentam um granito maciço, equigranular, fino a médio e de coloração cinza, e na GS-3 o granito possui enclaves máficos centimétricos a decimétricos (figura 22). Segundo o mapa de Janasi & Ulbrich (1992), esses corpos graníticos correspondem ao Itapeperica da Serra e Três Lagos (Parelheiros), respectivamente.



Figura 22 - Granito maciço, cinza claro, equigranular da pedreira GS-3

Para a região dos poços em estudo, o mapa geológico da figura 23 mostra com maior detalhe as unidades geológicas próximas à área. Observa-se que, na porção sudeste e noroeste do mapa, tem-se uma maior ocorrência dos sedimentos quaternários e da Formação Resende. Segundo Monteiro *et al.* (2012), a cobertura quaternária nessa região é constituída por argilas ricas em matéria orgânica, de coloração escura, moles a muito moles, e também por camadas arenosas, às vezes, com matéria orgânica ou cascalho, de coloração amarela a cinza escura, fofas a compactas.

Na porção oeste do mapa, há um predomínio das rochas do embasamento, micaxistos e biotita gnaisses migmatíticos, que notavelmente ocorrem de forma intercalada e alongadas segundo a direção NE. A foliação das rochas do Complexo Embu possui direção essencialmente NE e, portanto, paralela ao alongamento das unidades geológicas, exceto junto à represa Billings, onde se encontra dobrada.

Através da perfilagem OTV, esperava-se obter grande quantidade de informações a respeito das rochas do embasamento; porém, as imagens foram bastante prejudicadas por uma forte coloração alaranjada presente em todos os poços. Apenas os poços 256 e 1204 apresentaram trechos em que se pode observar com maior clareza a litologia do embasamento (anexo 2).

Pode-se dizer que, no poço 256, ocorre rocha cinza de granulação fina e estrutura maciça, onde há lentes de minerais félsicos, provavelmente, de granulação média e ocasionais lentes de coloração mais escura com granulação fina (figura 24 - a), e outra foliada, rica em máficos (provavelmente biotita), e provavelmente de granulação fina (figura 24-b). No trecho perfilado, onde se pode visualizar as rochas,

a primeira é mais espessa, com espessura métrica (1 m) a decamétrica (16 m), enquanto a segunda varia de decimétrica (0,30 m) a métrica (3,5 m).

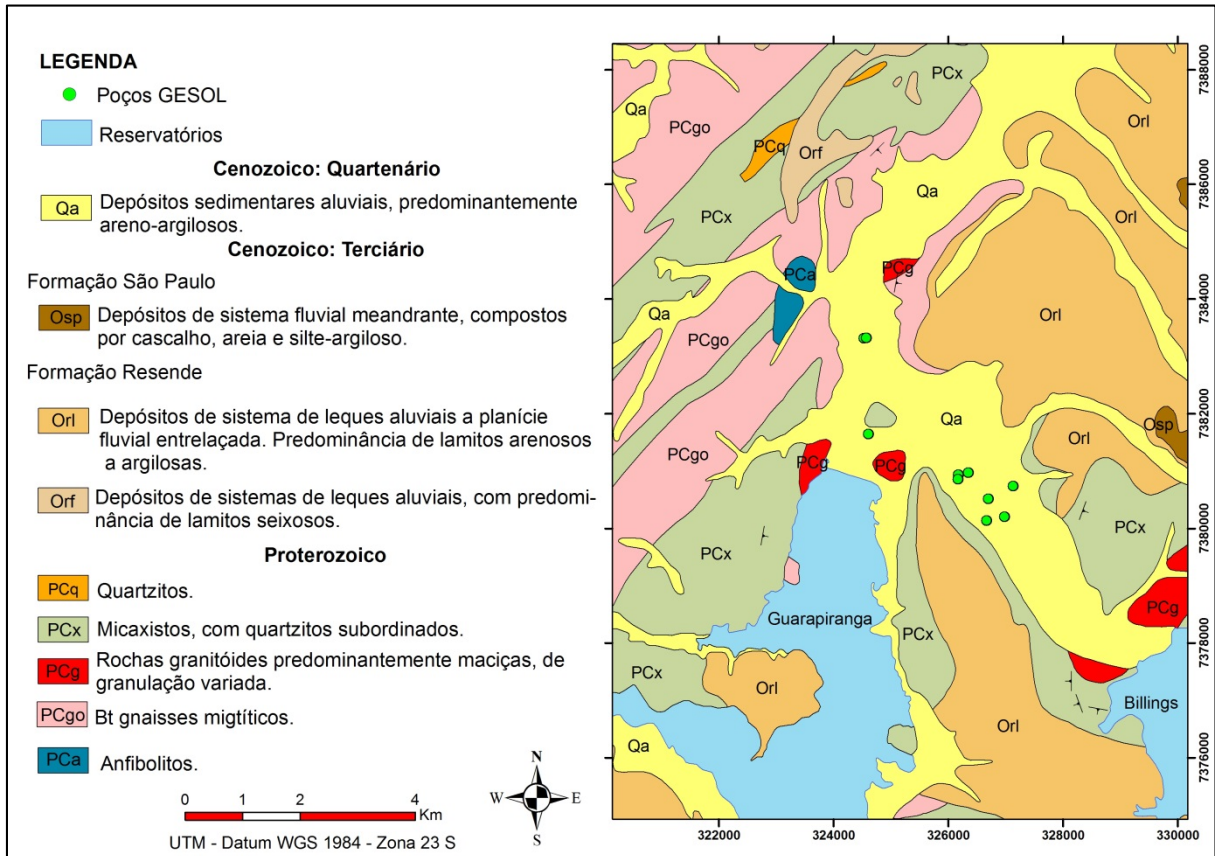


Figura 23 - Mapa geológico da área de estudo (adaptado de FUSP, 2002)

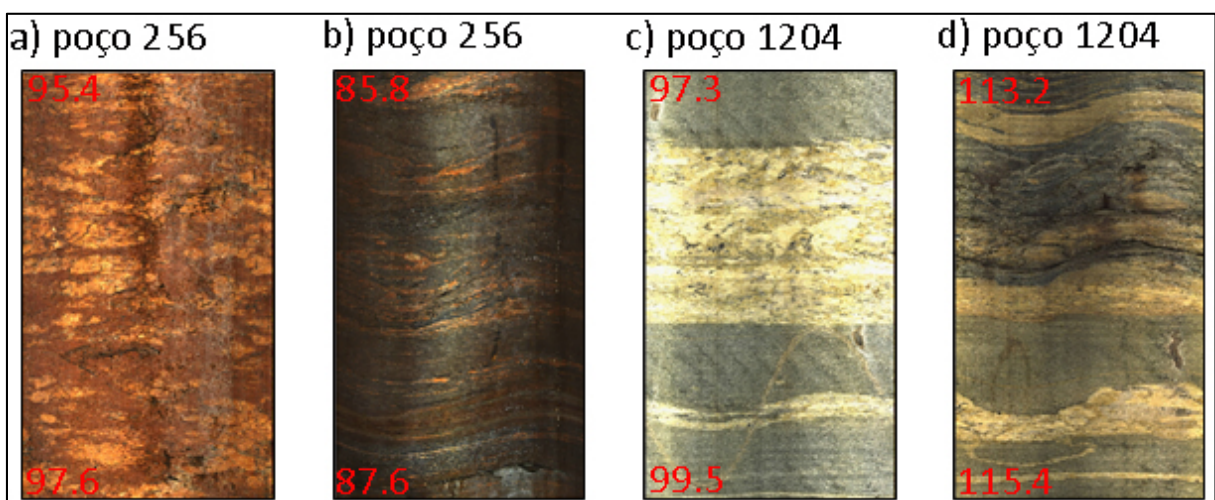


Figura 24 - Imagens OTV onde se observa: (a) poço 256, rocha de estrutura maciça, com lentes de minerais félsicos e granulação média e lentes mais escuras com granulação fina; (b) poço 256, rocha foliada, de granulação fina e rica em minerais máficos; (c) poço 1204, bandamento com porções máficas de granulação fina e porções félsicas de granulação fina a média; (d) trecho com camada xistosa, de cor mais escura e espessura cm a dcm; os números em vermelho marcam as profundidades

No poço 1204, também nota-se a presença de um bandamento de camadas, entretanto, este bandamento é diferente do observado no poço 256. Predomina rocha cinza-claro, granulação fina e espessura decimétrica (0,4 m) a métrica (5 m); secundariamente intercala-se com bandas de minerais félsicos com granulometria fina a média e espessura centimétrica a métrica (2,5 m; figura 24-c). Bandas xistosas, ricas em máficos (provavelmente biotita) e de espessura centimétrica a decimétrica (0,5 m; figura 24-d) são observadas em meio a rocha semelhante àquela observada na figura 24-c. De um modo geral trata-se de provável biotita-gnaísse com porções félsicas que podem corresponder tanto a bandas do gnaísse como a veios.

Apesar das rochas do embasamento não poderem ser observadas com clareza nos poços 255 e 1346, é possível visualizar a ocorrência de bandamento, o qual também é indicado pela perfilagem ATV. Além do bandamento, em todos os poços verifica-se a presença marcante de foliação. Algumas considerações a respeito da foliação foram feitas no item 4.4.2, onde são descritas fraturas paralelas à foliação e que foram condicionadas pela pré-existência dessa estrutura.

Comparando o principal litotipo encontrado na região dos poços com aqueles presentes nos afloramentos, considera-se que a pedreira GS-1, também constituída por gnaísse, é a que possui maior semelhança com a rocha do aquífero fraturado em estudo.

A figura 25 ilustra as variações na profundidade do topo do embasamento nas proximidades do canal Jurubatuba. Chama a atenção a brusca variação na profundidade do topo do embasamento na porção central da figura. As seções geológicas da figura 26, cujas localizações estão indicadas na figura 25, demonstram com maior detalhe essas variações no topo do embasamento.

Devido ao exagero vertical de 5x, pode-se interpretar as variações de cota do embasamento como um semi-gráben de direção ENE, na seção 1, e de um gráben de direção NE, na seção 3. No entanto, a variação mais acentuada, que ocorre na seção 3, corresponde a ~75 m de altitude em uma distância horizontal de ~625 m e, portanto, indica uma declividade de 0,12%, o que não é compatível com uma escarpa de falha e deve corresponder simplesmente a paleo-relevo.

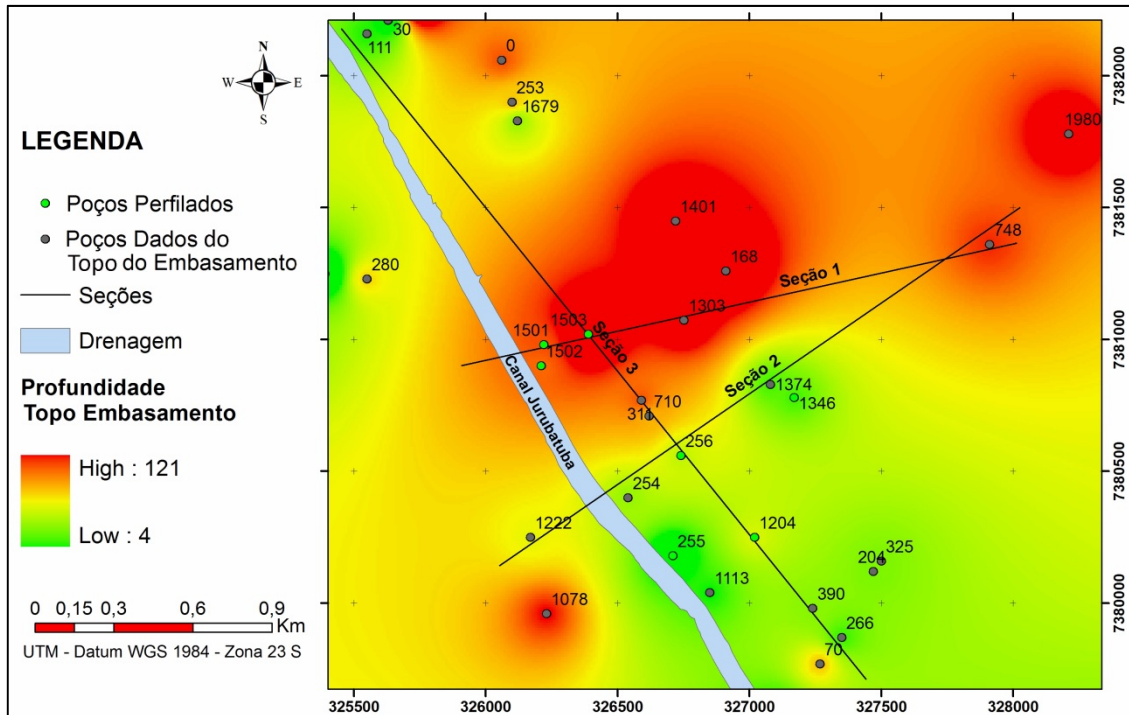


Figura 25 - Mapa com a profundidade do topo do embasamento e localização das seções geológicas

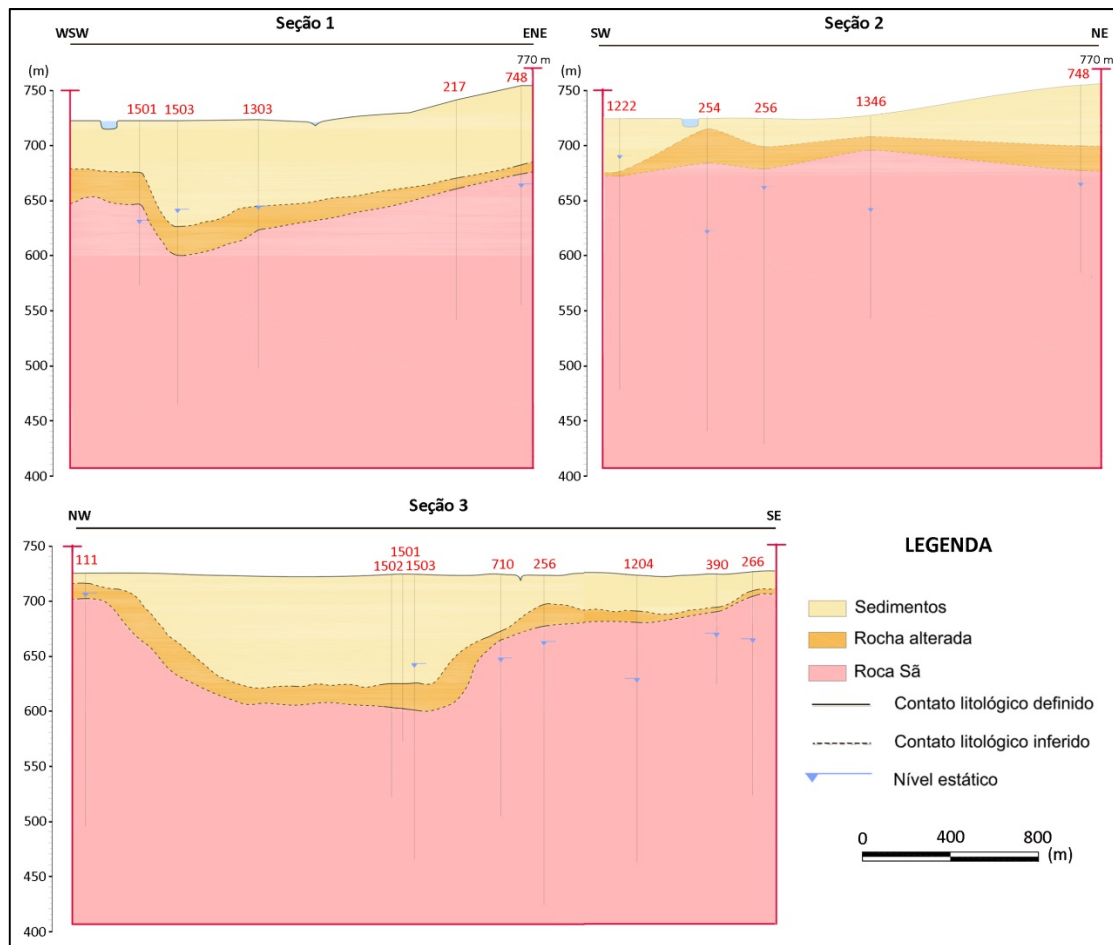


Figura 26 - Seções geológicas (1- ENE; 2- NE; 3- NW) com exagero vertical de 5x, realizadas a partir de dados de poços profundos (modificado de São Paulo, 2009)

4.2 Análise de Lineamentos

Como descrito no item 4.2, foram analisados lineamentos traçados sobre:

- MDE, mapa regional de lineamentos de Fernandes *et al.* (2005);
- MDT e mapa hipsométrico, ambos mapas de detalhe obtidos no presente trabalho.

Tais mapas com o traçado de lineamentos, em escala regional e local, podem ser observados nas figuras 27 e 28, respectivamente. O mapa regional de lineamentos tem a área de interesse ao centro, onde estão localizados os poços do projeto GESOL, e os afloramentos visitados a oeste, que correspondem a quatro pedreiras dentro do terreno Embu. A figura 28, ainda, contém o mapa hipsométrico, o qual auxiliou no traçado de lineamentos, pois verificou-se que com ele era possível utilizar de maior *zoom* (em relação ao MDT) sem que houvesse diminuição da nitidez do lineamento.

A figura 29 contém os histogramas de frequência da direção e do comprimento de lineamentos para as escalas regional e local, separadamente. Comparando os histogramas das direções (figura 29-a), verifica-se que os lineamentos de escala regional possuem uma variedade maior de *trends* principais do que os lineamentos de escala local. Os primeiros apresentam quatro direções principais: N30-50W, N10W-N10E, N20-40E e N60-90E; a frequência dessas direções são bastante próximas, havendo um ligeiro predomínio das direções NW e ENE. Os últimos, apesar de terem representantes em cada uma dessas direções principais, possuem maior predomínio da direção N-S em relação às demais, seguida pela direção E-W. Quanto à frequência do comprimento (figura 29-b), observa-se que os lineamentos de ambas escalas possuem uma distribuição assimétrica positiva, ou seja, a maioria dos comprimentos são menores do que o comprimento médio. Os valores mais frequentes estão entre 1 e 5 km e entre 200 e 250 m para os lineamentos em escala regional e local, respectivamente.

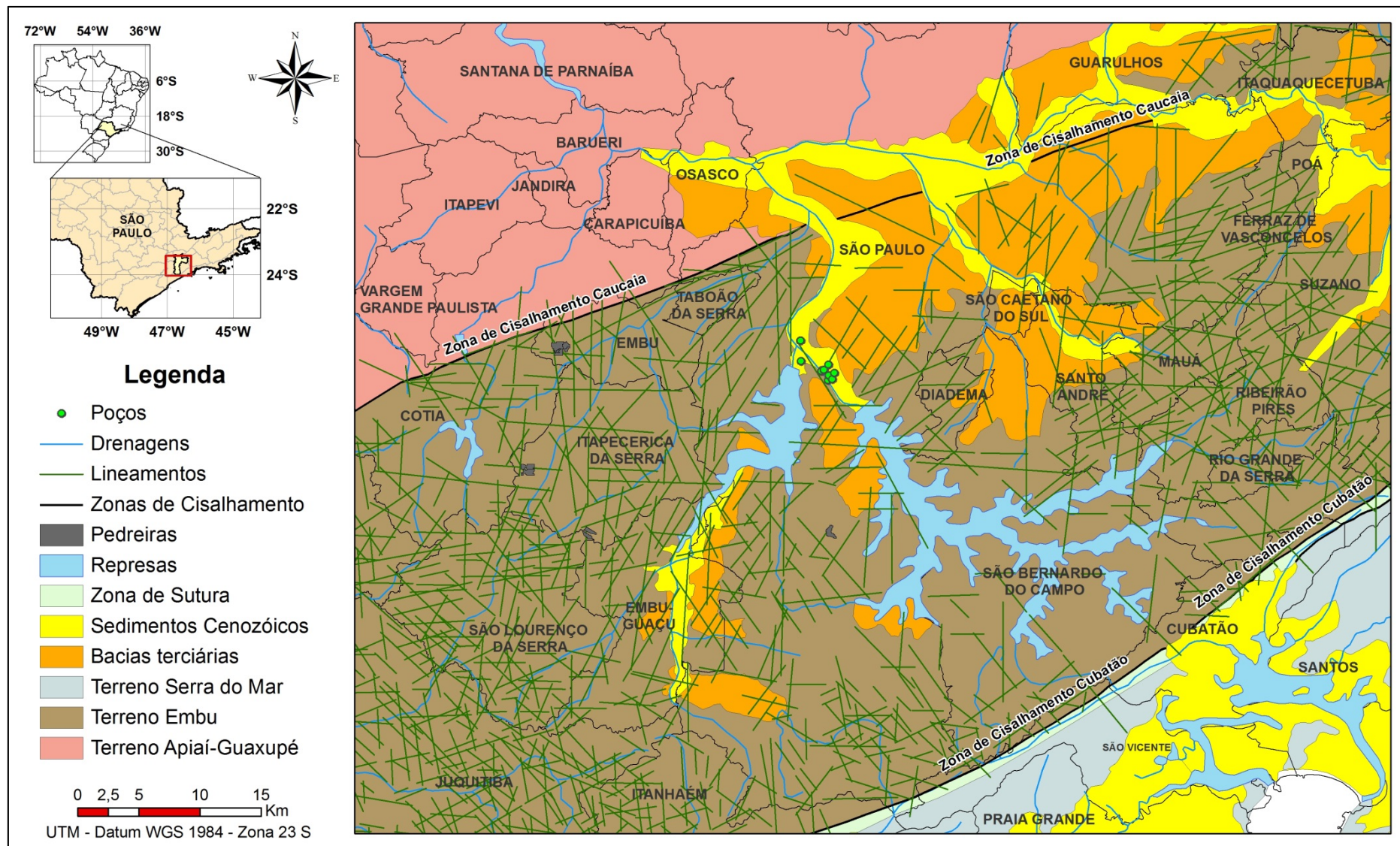


Figura 27 - Mapa de lineamentos, traçados em escala regional, somente para a área do Terreno Embu

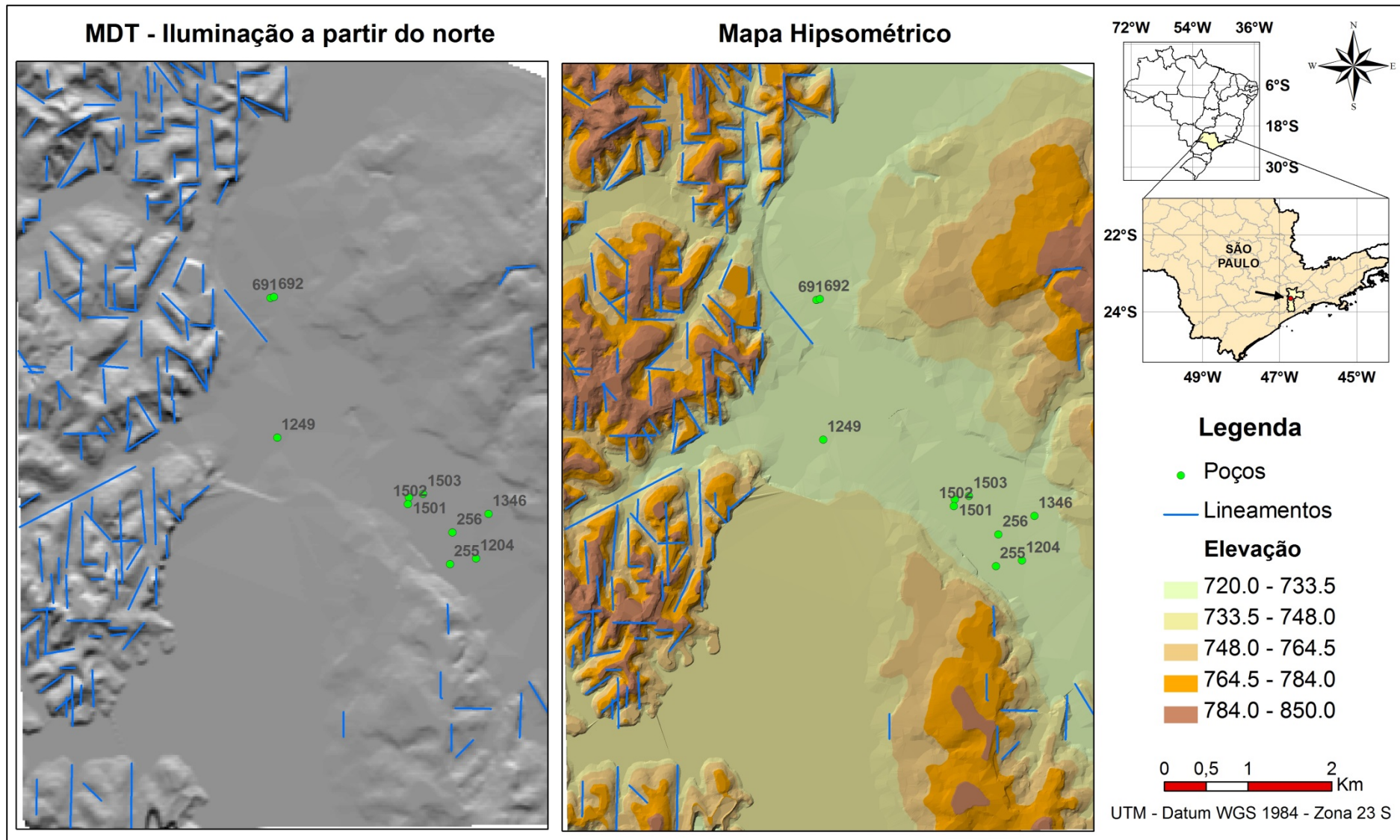


Figura 28 - MDT (a esquerda) e mapa hipsométrico (a direita) com o traçado de lineamentos em escala local

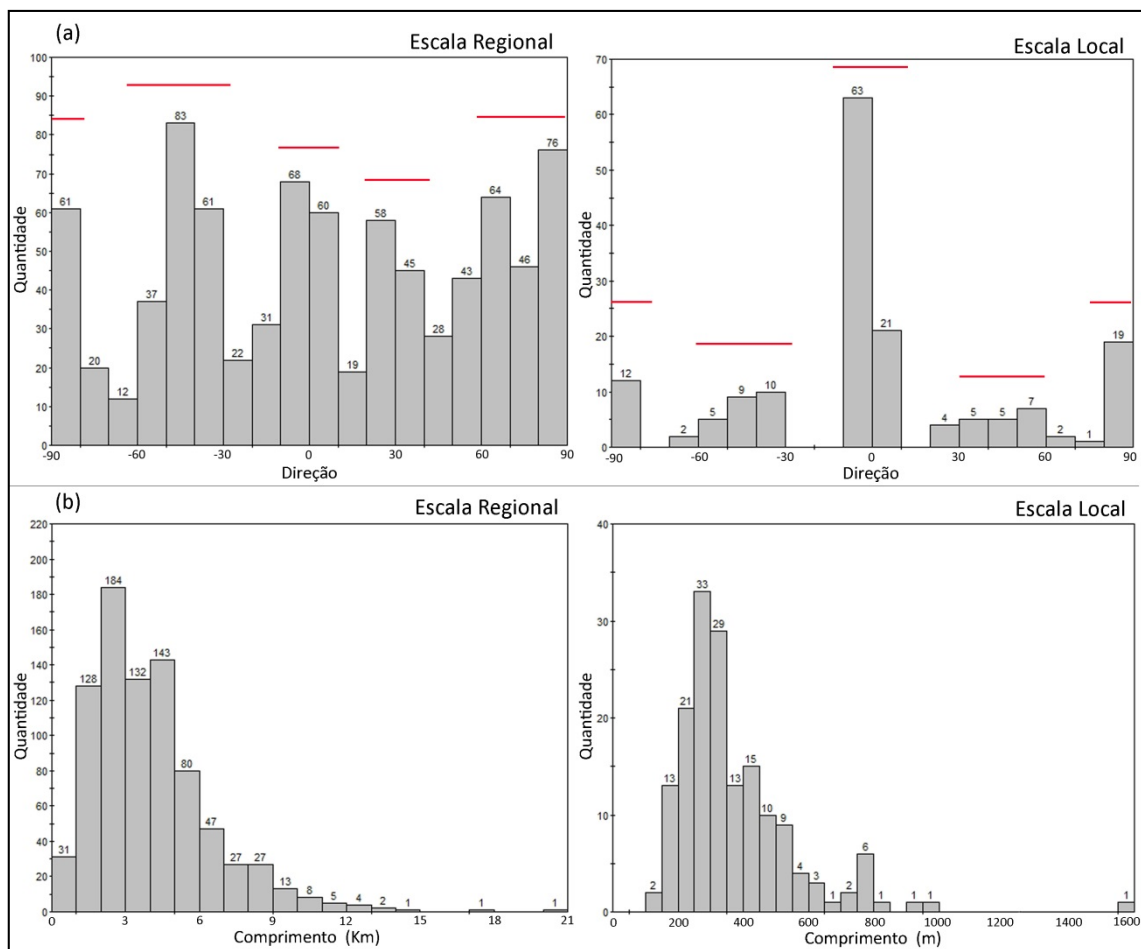


Figura 29 - (a) histogramas da frequência da direção de lineamentos traçados em escala regional e local; (b) histogramas da frequência do comprimento de lineamentos traçados nas referidas escalas

A figura 30 ilustra, através de diagramas de rosáceas, a somatória do comprimento dos lineamentos de mesma direção. Dessa forma, é possível comparar as direções em que os lineamentos são proeminentes com aquelas em que eles são mais frequentes. No caso dos lineamentos de escala regional, em que os principais *trends* possuem frequências parecidas, verifica-se uma maior importância, em relação aos comprimentos, da direção E-W, com predomínio para N80-90W, seguida pelas direções N40-60E e N10E, respectivamente. Com relação aos lineamentos de escala local, a direção de maior frequência, N-S, também é a direção em que os comprimentos são proeminentes. Porém, neste caso, tal fato também está relacionado com a quantidade relativa de lineamentos; uma vez que há, pelo menos, três vezes mais lineamentos com direção entre N10W e N10E do que as demais direções.

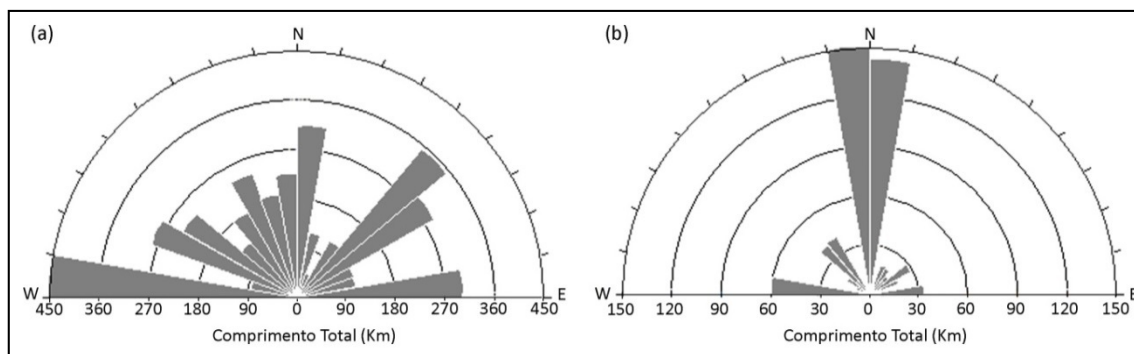


Figura 30 - Diagramas de rosáceas com o comprimento total de lineamentos de acordo com a sua orientação, para as escalas (a) regional e (b) local

Com relação ao mapa hipsométrico (figura 28), verifica-se a ocorrência de três padrões diferentes de relevo. Em toda a porção oeste, o relevo possui a maior declividade e corresponde à região de maior ocorrência da última classe de elevação, com os maiores valores de altitude da área, entre 784 e 850 metros. A porção leste possui um relevo menos acidentado do que o lado oeste e apresenta dois setores em que as altitudes se elevam suave e gradativamente. Tanto estes dois setores, como as porções leste e oeste, são separados por uma região plana, que contém as menores cotas topográficas da área. Apenas as duas primeiras classes de elevação estão presentes nessa região, de modo que a primeira classe – com valores entre 720 e 733,5 metros de altitude – ocorre na porção superior e sudeste da área, e a segunda classe – com valores de 733,5 a 748 metros de altitude – ocorre ao sul da área.

Os diferentes padrões de relevo apresentam correspondência com as diferentes unidades do mapa geológico da figura 23. Na porção oeste, de terreno mais acidentado, aflora o embasamento, constituído por uma alternância de xistos e gnaisses; nas regiões mais elevadas da porção leste, ocorrem os depósitos sedimentares terciários da Formação Resende da Bacia de São Paulo, enquanto as regiões mais planas correspondem à ocorrência dos depósitos quaternários onde se posicionam o canal Jurubatuba (primeira classe de elevação) e o reservatório Guarapiranga (segunda classe de elevação). Vale salientar que os poços em estudo se localizam na área de ocorrência da primeira classe de elevação, ou seja, estão em área com menor cota topográfica que o reservatório Guarapiranga.

4.3 Dados de Afloramentos

Os principais resultados obtidos a partir dos dados coletados em trabalhos de campo em afloramentos (pedreiras) consistem na identificação, caracterização e comparação dos principais grupos de fraturas presentes nos diferentes afloramentos, de modo a determinar (1) quais grupos são exclusivos e quais são comuns em determinados afloramentos e, para aqueles que são comuns, (2) verificar as semelhanças e as diferenças encontradas de um afloramento para o outro. Esses dados também foram utilizados para a determinação dos modos de propagação (extensionais, de cisalhamento ou híbridas) das fraturas dos grupos identificados e para a identificação dos eventos tectônicos, responsáveis por sua formação, e de suas relações cronológicas. Através desses resultados, foram realizadas inferências acerca dos grupos de fraturas mais favoráveis ao fluxo de água subterrânea no aquífero fraturado em estudo.

4.3.1 Caracterização dos Principais Grupos de Fraturas

As plantas dos afloramentos (pedreiras) visitados, com a localização das *scanlines* e das observações pontuais realizadas, constam nas figuras 31 e 32. Os principais grupos de fraturas identificados em cada afloramento estão representados em estereogramas elaborados, individualmente, para cada pedreira e separados de acordo com o método da amostragem, se coletados em *scanlines* (figura 33) ou em observações pontuais (figura 34). Os grupos foram definidos pelos estereogramas cujos dados foram provenientes apenas de *scanlines*, pois os pontos não permitem a correção da densidade das fraturas. Em cada pedreira, os principais grupos de fraturas foram numerados sequencialmente de acordo com a ordem decrescente de importância, a qual foi estabelecida pela quantidade de fraturas.

Comparando os estereogramas gerados nas duas situações, verifica-se que a maioria das fraturas dos pontos de observação pertence a algum dos grupos definidos, ou são fraturas com distribuição randômica, salvo por uma exceção, na pedreira GS-3, onde foi identificado um grupo de fraturas não observado nos dados de *scanlines*. Esse grupo será apresentado e discutido adiante.

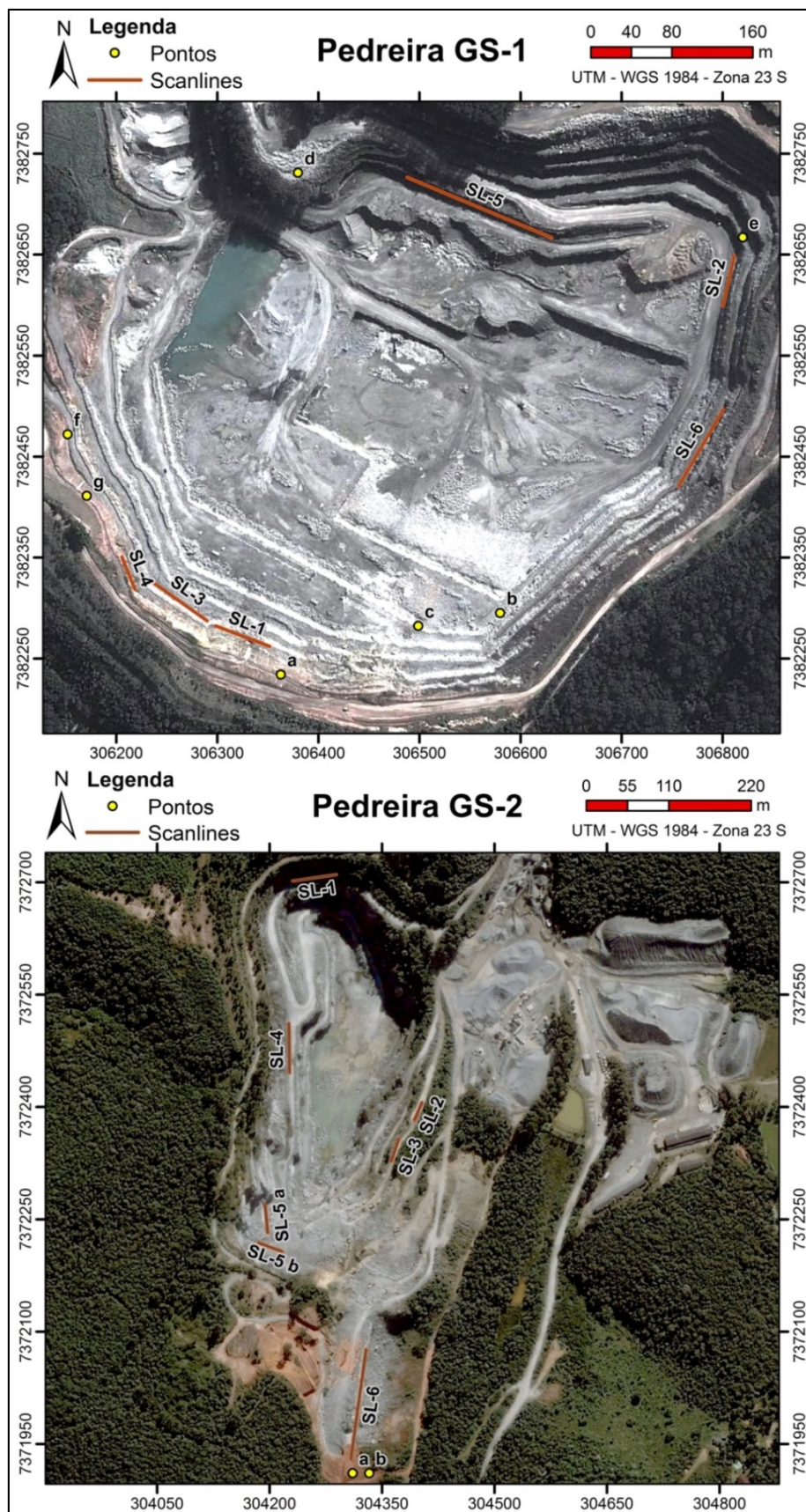


Figura 31 - Planta das pedreiras GS-1 e GS-2 com a localização das scanlines e dos pontos de observação

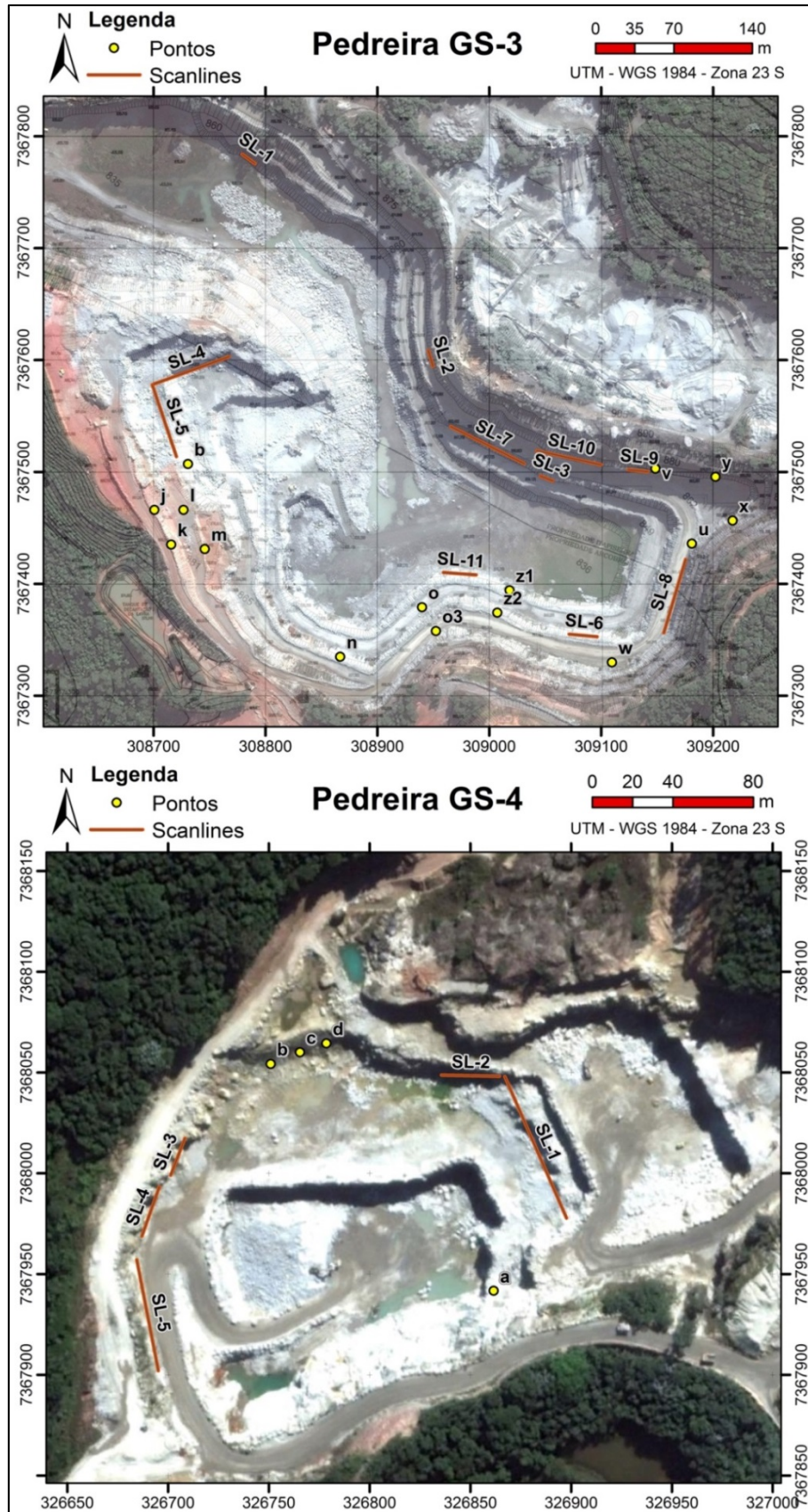


Figura 32 - Planta das pedreiras GS-3 e GS-4 com a localização das scanlines e dos pontos de observação

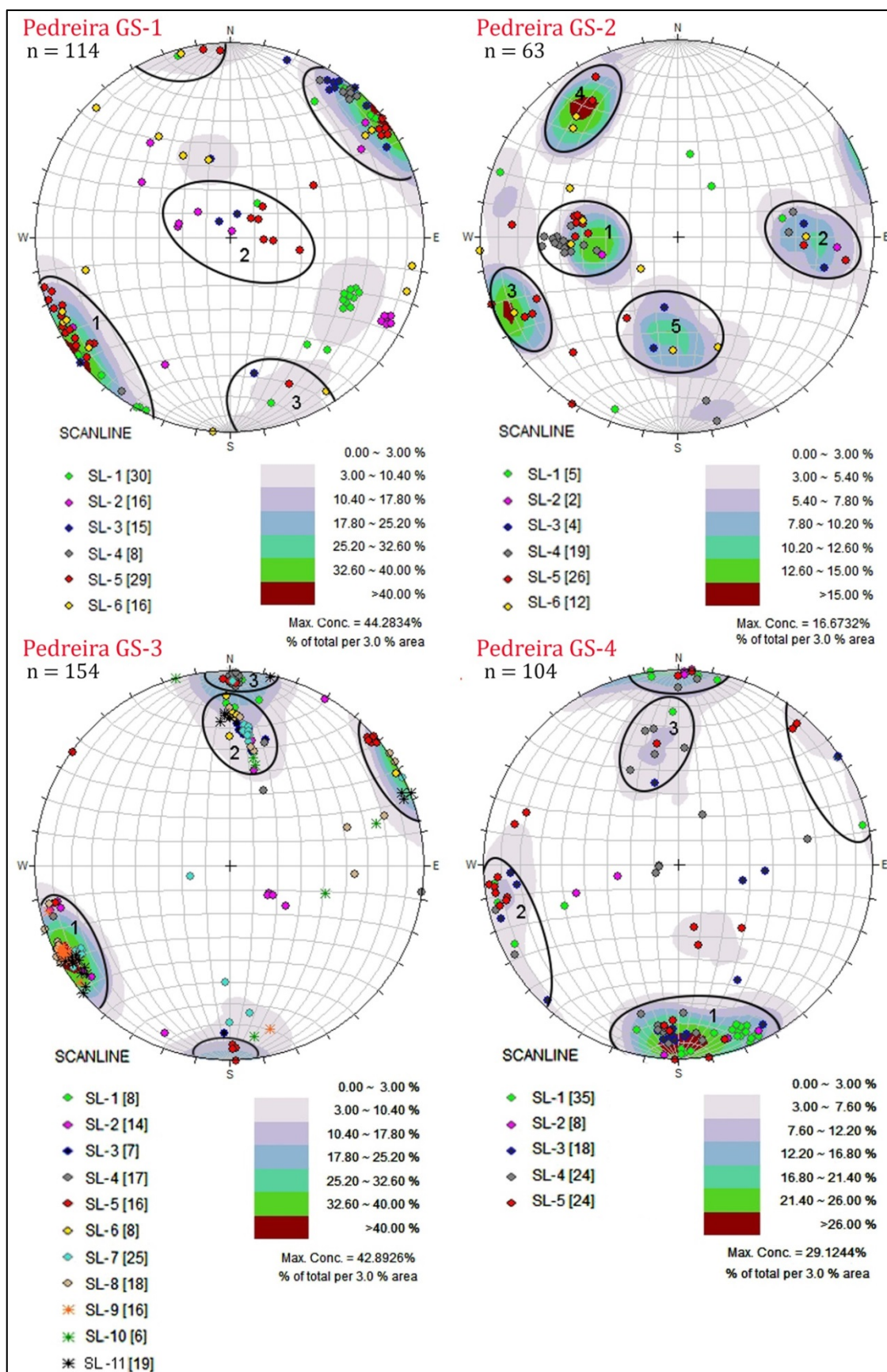


Figura 33 - Estereogramas com os dados de fraturas obtidos através de *scanlines*, com os contornos de densidade corrigidos com relação ao viés de orientação e os grupos de fraturas identificados, separados por afloramento

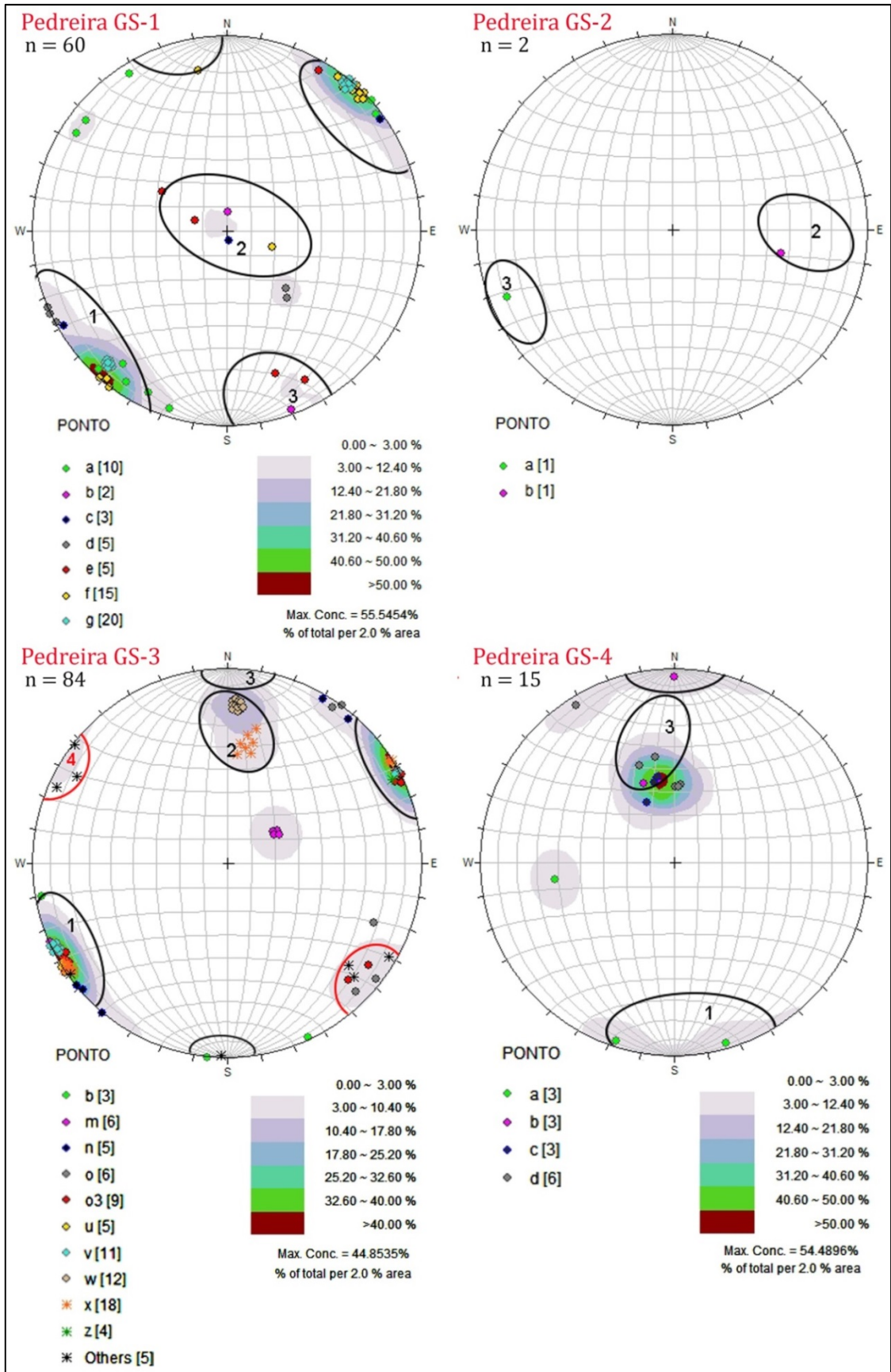


Figura 34 - Estereogramas com os dados de fraturas obtidos através dos pontos de observação, com os contornos de densidade e os grupos de fraturas identificados, separados por afloramento

Na figura 35, é possível observar as variações de direção e mergulho das fraturas pertencentes aos principais grupos identificados em cada afloramento.

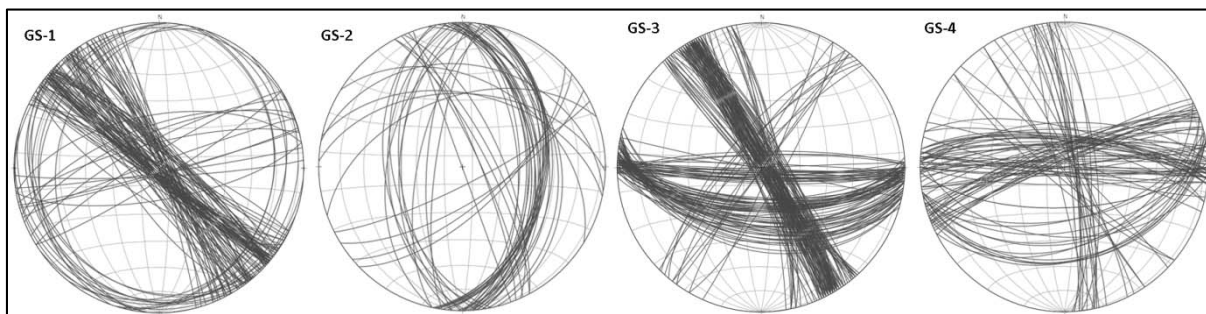


Figura 35 - Estereogramas com círculos máximos das fraturas que pertencem aos grupos de fraturas identificados em cada afloramento (dados amostrados em *scanlines* e em pontos de observação)

Verifica-se através das figuras 33 e 35 que as pedreiras GS-3 e GS-4 são as que apresentam maior semelhança entre si; enquanto, as pedreiras GS-1 e GS-2 possuem determinados grupos, marcantes e exclusivos de cada uma delas. Na GS-1, trata-se do grupo de fraturas subhorizontais, com mergulho inferior a 30° , e na GS-2, são os grupos de direção N-S e ângulo de mergulho entre 30° e 60° para leste (grupo 1) e entre 45° e 75° para oeste (grupo 2). Observa-se, ainda, que o único grupo com ocorrência comum em todos os afloramentos é o de direção NW a NNW e mergulho subvertical. As pedreiras GS-3 e GS-4 possuem mais dois grupos em comum: (1) grupo de direção E-W e mergulho entre 30° e 70° , para sul e (2) grupo de direção E-W com mergulho subvertical. Na pedreira GS-2, o grupo de direção E-W e mergulho entre 30° e 60° , para norte, pode estar relacionado com o grupo de mesma direção, mas com mergulho no sentido oposto, observado na GS-3 e GS-4. Um último grupo de fraturas foi identificado nas pedreiras GS-2 e GS-3, que corresponde ao grupo de direção NE, com mergulhos entre 65 e 90° . Na pedreira GS-1, ocorre um grupo de direção ENE e mergulho entre 60° e 90° , que pode estar relacionado tanto com o grupo E-W subvertical, das pedreiras GS-3 e GS-4, quanto ao grupo NE.

O grupo de fraturas de direção NW a NNW e mergulho subvertical está identificado como: grupo 1, nas pedreiras GS-1 e GS-3; grupo 2, na pedreira GS-4; e grupo 3, na pedreira GS-2 (figura 33). O número do grupo em cada afloramento reflete a variação da importância desse grupo conforme a pedreira, sendo que o grupo é mais importante na GS-1 e na GS-3.

Apesar desse grupo ter direção geral NW, verifica-se que ocorrem variações na sua direção de um afloramento para o outro (figuras 33 e 35). Na pedreira GS-1, as fraturas estão ampla e continuamente distribuídas, com direções que variam no intervalo N10-60W; na GS-2, as fraturas se concentram entre N20-30W; na GS-3, as fraturas ocorrem entre N10-40W e, apesar de estarem dispersas quando mergulham para SW, elas se aglomeram formando dois subgrupos quando mergulham para o lado oposto: um de direção N10W e outro N30W; na GS-4, as fraturas apresentam certa dispersão, mas ocorrem predominantemente no intervalo N0-20W.

As fraturas desse grupo são planas e contínuas: na GS-1 e na GS-4, o seu comprimento é métrico a decamétrico (figuras 36-a e -b); na GS-3, são pelo menos decamétricas, pois seccionam de forma contínua as várias bancadas da pedreira (figura 37). Nas pedreira GS-1 e GS-3, frequentemente, formam zonas cujas fraturas apresentam espaçamento decimétrico a métrico (figura 36-a), ou mesmo centimétrico. Na GS-3, porém, verifica-se que existem algumas diferenças entre os dois subgrupos mencionados acima: enquanto as fraturas do subgrupo N30W estão amplamente distribuídas pela pedreira, geralmente, constituindo zonas de fraturas com alta densidade (espaçamento chega a centimétrico), as fraturas do subgrupo N10W são muito mais restritas e não constituem zonas. Na pedreira GS-2, diferente das principais características observadas nas outras pedreiras, as fraturas ocorrem em quantidade restrita, são bem menos contínuas (comprimento métrico) e ocorrem isoladamente.

Uma característica comum observada nas superfícies de fraturas desse grupo, nas pedreiras GS-1 (fraturas N50W), GS-3 (subgrupo N10W) e GS-4 (N0-20W), consiste na feição de pluma (figuras 36-c e -d). Outra característica considerada comum é que tais fraturas, frequentemente, possuem alteração de cor ocre em suas superfícies (figura 36). Peculiarmente, uma fratura da GS-4 apresentou preenchimento composto por turmalinas. Vale ainda salientar que, na pedreira GS-3, as zonas de menor densidade (sendo estas menos comuns) não possuem indícios de fluxo de água subterrânea, enquanto, nas zonas de alta densidade, ocorre vegetação ao longo de parte das fraturas. No ponto X, onde ocorre uma dessas zonas de alta densidade (figura 38; com atitude média 57/88), bastante contínua (propaga-se em pelo menos três bancadas de aproximadamente 15 m cada) e com parte de suas fraturas acompanhada pela presença de vegetação, foi observado dique máfico de espessura centimétrica, parcialmente alterado.

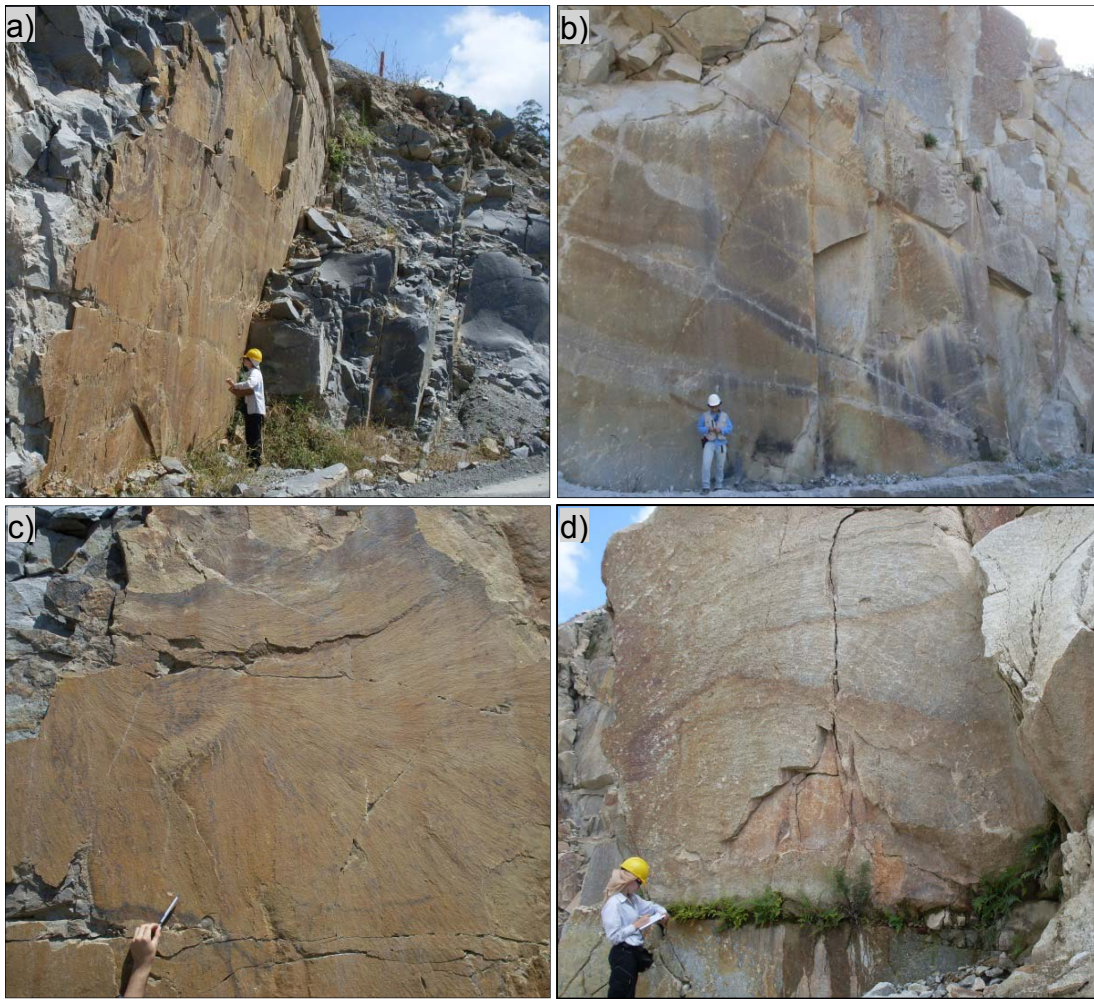


Figura 36 - (a) GS-1, SL-4: zona de fraturas NW com espaçamento dm e superfície ocre (atitude média 220/85); (b) GS-4, SL-5: fratura NNW contínua com superfície ocre (atitude 83/84); (c) GS-1, SL-4: detalhe da fratura em (a) mostrando feição de pluma; (d) GS-4, SL-4: fratura NNW com alteração ocre e feição de pluma (atitude 86/82)



Figura 37 - GS-3, ponto U: zona de fratura do grupo NW (atitude média 58/90); notar os traços retilíneos e a grande continuidade (ocorre continuamente nas quatro bancadas visíveis neste local da pedreira)

A mesma zona de fraturas tem continuidade com o ponto V, assim como o ponto X tem continuidade com o ponto Y (ver planta da pedreira na figura 33)

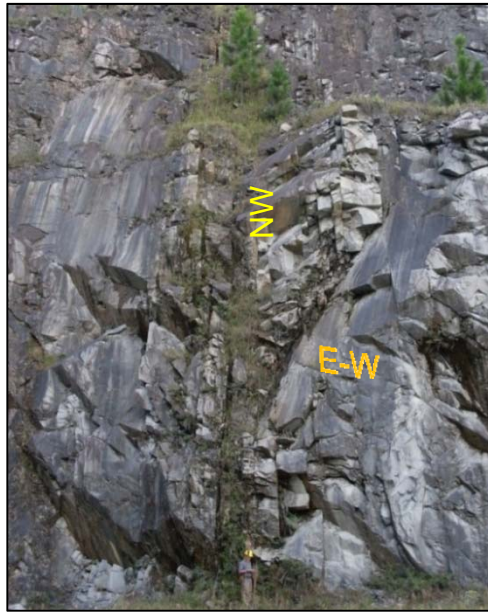


Figura 38 - GS-3, ponto X: ao centro tem-se uma zona de fraturas NW verticais (atitude média 57/88), muito contínuas, parcialmente, acompanhada por vegetação, onde foi observado um dique máfico cm; na porção direita, grande parte das fraturas desta zona terminam em fratura E-W de médio ângulo, a qual, na sua porção superior, passa a ser subvertical e mantém a direção E-W

O grupo de direção E-W, com mergulho de ângulo médio, entre 40° e 70° (GS3) e 30° e 65° (GS-4), para sul, ocorre de modo muito mais significativo na pedraira GS-3 (grupo 2). Apesar desse grupo possuir, de modo geral, direção E-W, verifica-se que, na pedraira GS-3, a direção das fraturas tende para WNW e, na GS-4, a tendência se dá para ENE. Em ambos os afloramentos, também ocorre uma dispersão em relação ao mergulho, como descrito acima, que varia de 30 a 70°, devendo assim englobar estruturas que foram geradas em campos de esforços distintos, pois fraturas com mergulho em torno de 30° formam-se em regime inverso (ou seja, de falhas inversas) e fraturas com mergulho em torno de 60°, em regime normal (ou seja, de falhas normais). Porém, uma separação em termos de grupos, não foi feita devido à variação contínua dos mergulhos.

Na GS-3, tais fraturas se caracterizam por terem comprimento métrico a decamétrico, serem planas a suavemente curvas, formarem explícitos pares conjugados com fraturas de direção E-W e mergulho para norte, indicando geração em regime de esforços normal (ver item 4.3.2), e apresentam até zonas de fratura em alguns locais (figura 39). Na GS-4, essas fraturas também são contínuas e planas a suavemente curvas, porém, não formam pares conjugados e tendem a ocorrer isoladamente. No estereograma dos pontos (figura 34), observa-se que os dados dos pontos B, C e D da GS-4 caracterizam muito bem um conjunto de fraturas de direção ao redor de E-W com mergulhos variando de 35° a 45° para sul. Com relação às feições indicativas de fluxo, na GS-3, tipicamente, as fraturas não

apresentam nenhum tipo de alteração, e na GS-4, ocorre alteração superficial de cor ocre de forma bastante restrita.

Na pedreira GS-2, verifica-se a presença de um grupo de fraturas (grupo 5) com direção E-W e mergulho entre 30° e 50° para norte. Considerando a sua direção e o seu ângulo de mergulho, é possível que este grupo seja geneticamente relacionado ao grupo de direção E-W com mergulho médio identificado nas pedreiras GS-3 e GS-4. Na GS-2, tais fraturas ocorrem de forma bastante restrita. São de comprimento métrico a decamétrico e podem apresentar duas a três fraturas próximas, com espaçamento decimétrico. Apenas uma de suas representantes apresentou superfície de coloração ocre.

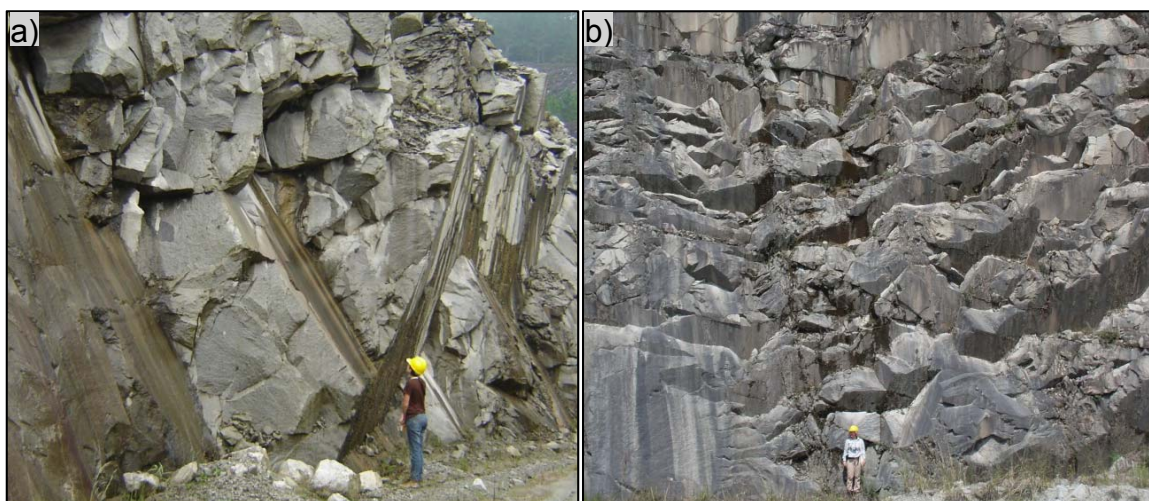


Figura 39 - (a) GS-3, SL-3: fraturas de direção E-W e mergulho ora para norte, ora para sul, formando pares conjugados (atitudes médias 2/75 e 185/60) que indicam regime de esforços normal; (b) GS-3, ponto W: zonas de fraturas de direção E-W e mergulho para sul (atitude média 185/70)

O grupo de direção E-W com mergulho subvertical, também observado nas pedreiras GS-3 e GS-4, é consideravelmente mais abundante na GS-4 (grupo 1) do que na GS-3 (grupo 3). Nota-se, ainda, variação na direção das fraturas para ENE (N60-90E) na GS-4. Em ambas as pedreiras, as fraturas são contínuas, planas e podem ocorrer como zonas de fraturas (figura 40); estas apresentam espaçamento decimétrico a métrico e, geralmente, são menos densas do que as zonas do grupo de direção NW com mergulho subvertical.

Outra característica comum, observada nos dois afloramentos, é a presença de feições indicativas de fluxo. Na pedreira GS-3, verificou-se apenas alteração superficial de coloração ocre, enquanto na GS-4, as feições observadas foram mais

marcantes, tais quais: halos de alteração, rocha friável no contato com a fratura e vegetação. No entanto, isto pode ter sido devido ao fato das bancadas na GS-4 estarem mais próximas da superfície do terreno, pois a pedreira é muito menos profunda.

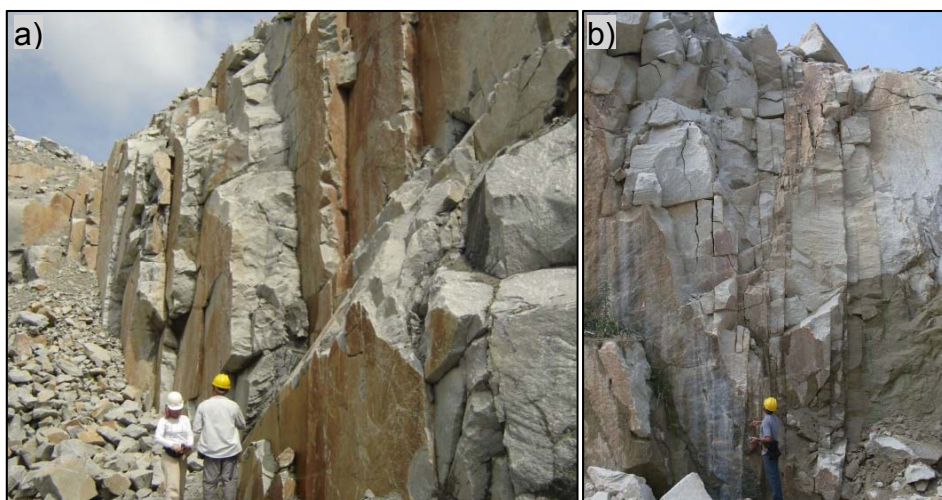


Figura 40 - (a) GS-3, SL-4: zona de fratura do grupo E-W subvertical (atitude média 180/86) junto com fratura E-W de ângulo médio (196/55); (b) GS-4, SL-1: zona de fratura do grupo E-W a ENE subvertical (atitude média 340/80)

O grupo de fraturas com direção NE e mergulho subvertical foi encontrado nas pedreiras GS-2 e GS-3 (grupo 4 em ambas), e possui maior ocorrência na GS-3, onde foi, exclusivamente, identificado pelos dados de pontos (figura 34). Neste afloramento, as fraturas têm direção entre N20-50E e mergulho maior que 75° para NW ou SE. Na pedreira GS-2, onde há poucas representantes deste grupo, a direção é N40-60E e o mergulho é superior a 60° para SE. Em ambas as pedreiras, tais fraturas possuem grande espaçamento e não são muito frequentes, apresentam comprimento métrico a decamétrico e se caracterizam por ocorrerem isoladamente (figura 41). A principal diferença dessas fraturas nestas pedreiras consiste em, enquanto na GS-3, as fraturas se destacam por sua forte alteração terrosa - de caráter intempérico - contrastando com a rocha fresca nas vizinhanças imediatas de tais fraturas, na GS-2, as fraturas não possuem nenhuma forma de alteração.

As fraturas do grupo 3 da pedreira GS-1, de direção ENE (N60-90E) com mergulho entre 60° e 90°, apresenta maior proximidade de direção com o grupo E-W subvertical, descrito acima para as pedreiras GS-3 e GS-4. Entretanto, as outras características, como pouca continuidade (poucos metros de comprimentos),

superfícies ligeiramente curvas e grande espaçamento (ocorrência isolada), as aproximam das fraturas de direção geral NE. Algumas fraturas ocorrem no contato com veios félsicos, indicando uma reativação de tal estrutura pré-existente; esta relação pode explicar a variação dos ângulos de mergulho, pois o grupo contém tanto fraturas subverticais como fraturas de ângulo médio (60°), típicas de regime transcorrente ou normal, respectivamente.

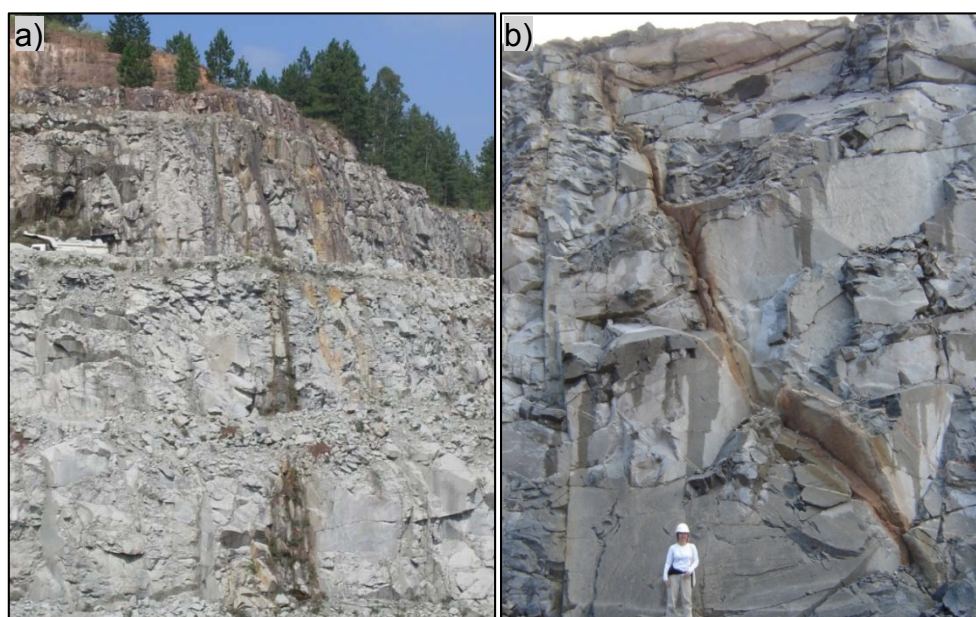


Figura 41 - (a) GS-1, vista da SL-11 (bancada inferior) e dos pontos O e O₃ (bancadas do meio e superior, respectivamente): as fraturas com forte alteração nos pontos O e O₃ são NE (308/86 e 306/78, respectivamente) e, na SL-11, trata-se de uma zona de fraturas NW (atitude média 60/85); (b) GS-1, ponto J: fratura NE (310/70) com coloração ocre e rocha alterada ao longo de seu prolongamento

Além destas, na pedreira GS-1, ocorrem fraturas propriamente de direção NE, mas de importância subordinada, que não aparecem como grupo definido; apresentam direção N10-60E e mergulho maior que 78° para NW ou SE (figuras 33 e 34). Suas características diferem na própria pedreira, podendo ocorrer como fraturas isoladas com poucos metros de comprimento (SL-6), ou como fraturas decamétricas constituindo zonas (SL-2) ou com padrão anastomosado (no ponto A; este indica gênese por cisalhamento). A maior parte dessas fraturas não possui feição de alteração; entretanto, imediatamente junto a essas fraturas do ponto A, foi observada intensa alteração na rocha, com espessura em torno de 10 cm. Nesta pedreira, ainda ocorrem fraturas com direção N30-75E e mergulho de 30° a 44° principalmente para SE, e outras de direção N23-55E e mergulho de 53° a 65°

predominantemente para NW. Parte destas de mergulho médio, e mais subordinadamente as de mergulho baixo, são paralelas à foliação (figura 21), indicando se tratarem de reativação das estruturas pré-existentes, o que dificulta a identificação do campo de esforços que as geraram. São fraturas contínuas (comprimento métrico a decamétrico), que podem formar zonas de fraturas (e.g. verificou-se uma zona de fraturas na SL-1 mimetizando a foliação) e, geralmente, possuem alteração superficial de cor ocre, podendo ocorrer, por vezes, presença de vegetação. Dentre os quatro afloramentos visitados, a GS-1 é a que apresenta rochas (gnaisse) com foliação mais marcante, o que explica a maior presença de fraturas paralelas a esse tipo de estrutura.

O grupo de fraturas com mergulho inferior ou igual a 30° (baixo ângulo e sub-horizontais) e direção dispersa, exclusivo da pedreira GS-1, ocorre de forma marcante neste afloramento (grupo 2). Constituem fraturas bastante contínuas, que alcançam dezenas de metros de comprimento, suavemente onduladas e que formam zonas de fraturas com espaçamento centimétrico a decimétrico. Nas porções mais rasas do afloramento, algumas destas fraturas estão conectadas com a superfície do terreno por fraturas oblíquas, também contínuas, com mergulho em torno de 30° ; todas estão notavelmente mais alteradas (espessura decimétrica) do que as fraturas situadas em maior profundidade (figura 42). No entanto, mesmo em maior profundidade, é comum que apresentem superfície ocre e faixas centimétricas de alteração (figura 43). Outros aspectos indicativos de fluxo também foram constatados, como vegetação e até o próprio fluxo de água que surge na intersecção com a parede.

Os grupos de fratura de direção N-S com ângulo de mergulho entre 30° e 60° para leste (grupo 1) e entre 45° e 75° para oeste (grupo 2) constituem os principais grupos da pedreira GS-2 e são exclusivos desta. O formato alongado da pedreira, no sentido N-S (figura 31), possibilitou que houvesse uma maior amostragem das fraturas que mergulham para leste (grupo 1), na parede oeste, e uma maior amostragem das fraturas que mergulham para oeste (grupo 2), na parede leste. Porém, considerando que as bancadas leste estavam parcialmente inacessíveis, pode ter ocorrido uma subamostragem das fraturas do segundo grupo.



Figura 42 - GS-1, próximo à SL6: fraturas de sub-horizontais bastante contínuas, que alcançam dezenas de metros de comprimento, suavemente onduladas

Nas primeiras três bancadas, algumas destas fraturas estão conectadas com a superfície do terreno por fraturas oblíquas, também contínuas, com mergulho em torno de 30°; todas estão notavelmente mais alteradas (espessura dcm) do que as fraturas situadas em maior profundidade



Figura 43 - GS-1, ponto B: observam-se fraturas de sub-horizontais com alteração evidente (cor ocre) na porção central da foto, e fraturas NW quase ortogonais à parede, terminando nas fraturas sub-horizontais; acima e abaixo da faixa com fraturas sub-horizontais de cor ocre, a rocha apresenta-se menos alterada

Esta foi uma das fotos utilizadas para calcular a densidade das fraturas subhorizontais (ver figura 45-b com resultados)

As características em comum das fraturas de ambos os grupos N-S são o comprimento métrico a decamétrico e a ausência de feições de alteração. As principais diferenças são que as fraturas com mergulho para oeste ocorrem no contato entre veio e rocha (figuras 44-a e -b), são próximas às atitudes da foliação, conforme se pode observar no estereograma da figura 21, e não formam zonas de fraturas. As fraturas com mergulho para leste, além de não estarem associadas às estruturas pré-existentes, constituem zonas de fratura com espaçamento decimétrico e apresentam padrão anastomosado (figuras 45-a e -b).

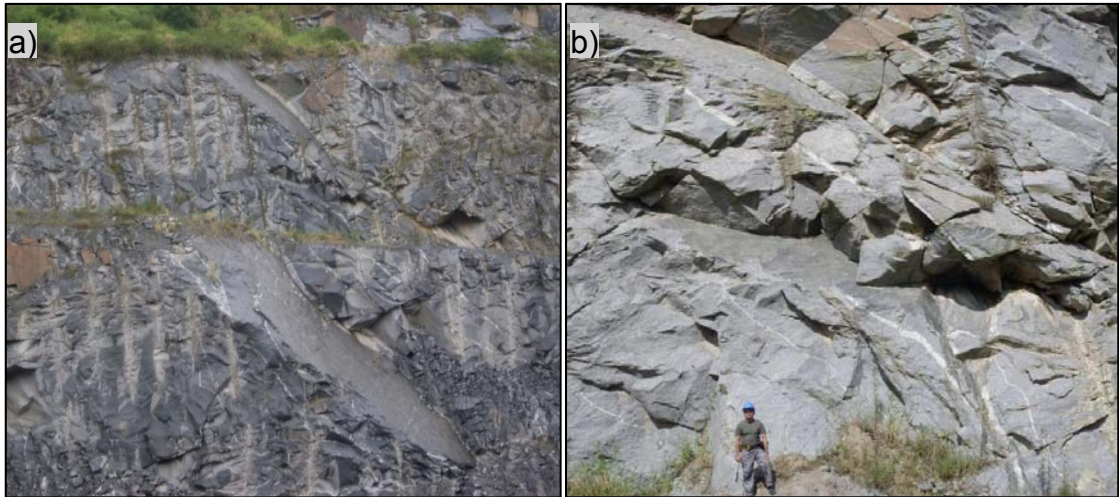


Figura 44 - (a) GS-2, vista de duas bancadas de direção NNE: fraturas de direção N-S com mergulho de ângulo médio para oeste, paralelas a veios félsicos e contínuas; (b) GS-2, SL-3: detalhe da bancada superior de (a), onde há duas fraturas com atitude média 280/65

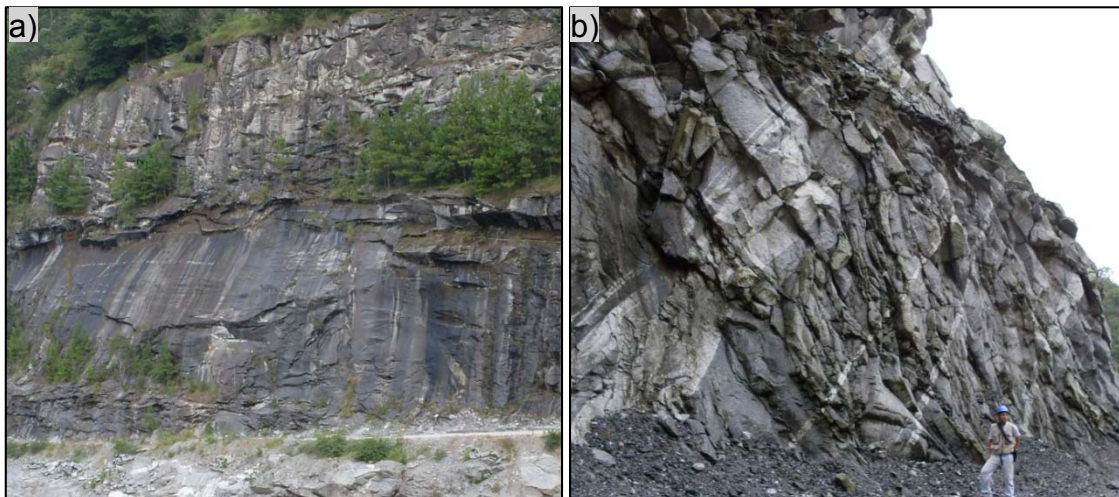


Figura 45 - (a) GS-2, vista da SL-4: fratura contínua, de direção N-S com mergulho de ângulo médio para leste; (b) GS-2, SL-5: zona de fratura com espaçamento cm a dm, padrão anastomosado e discordantes dos veios (atitude média 100/42)

Além das características descritas para cada grupo, também foram avaliados as densidades e os espaçamentos entre fraturas isoladas e/ou zonas de fraturas. A tabela 6 apresenta o resultado obtido para cada *scanline* com mais de duas fraturas por grupo. Verifica-se que os valores obtidos pelos métodos de Terzaghi (1965) e de Kiraly (1970) são bastante semelhantes, havendo, por vezes, diferenças que podem ser consideradas pequenas. Sendo assim, para facilitar a discussão destes resultados, serão utilizados aqueles obtidos através do método de Terzaghi.

Tabela 6 - Valores de densidade e de espaçamento de cada grupo de fraturas, separadamente, por *scanline* (onde haviam, no mínimo, duas fraturas do grupo em questão) obtidos através dos métodos de Terzaghi (1965) e de Kiraly (1970)

Pedreira	Scanline	Grupo	N° Frat	α	Método Terzaghi (1965)				Método Kiraly (1970)			
					N90*10	N90	Dens	Espac	L	L*cos θ	Dens	Espac
GS-1	SL-1	1 (NW)	6	33	167	17	0,28	3,6	60	32,7	0,18	5,4
GS-1	SL-2	1 (NW)	3	54	42	4	0,09	10,7	45	36,4	0,08	12,1
GS-1	SL-4	1 (NW)	4	21	75	8	0,21	4,7	35	12,5	0,32	3,1
GS-1	SL-5	1 (NW)	5	20	113	11	0,07	13,7	155	53,0	0,09	10,6
GS-1	SL-6	1 (NW)	6	76	67	7	0,08	13,0	87	84,4	0,07	14,1
GS-1	SL-1	3 (ENE)	2	31	40	4	0,07	15,0	60	30,7	0,07	15,3
GS-1	SL-5	3 (ENE)	3	44	49	5	0,03	31,6	155	106,9	0,03	35,6
GS-1	SL-6	3 (ENE)	2	40	41	4	0,05	21,2	87	55,5	0,04	27,8
GS-2	SL-6	4 (NE)	2	41	36	3,6	0,04	27,8	100	65,7	0,03	32,8
GS-2	SL-3	5 (EW/N)	2	42	34	3,4	0,11	8,8	30	20,0	0,10	10,0
GS-2	SL-6	5 (EW/N)	2	43	29	2,9	0,03	34,5	100	68,1	0,03	34,1
GS-3	SL-7	1 (NW)	6	31	120	12	0,09	10,8	129	66,2	0,09	11,0
GS-3	SL-8	1 (NW)	4	49	60	6	0,07	13,8	83	62,4	0,06	15,6
GS-3	SL-9	1 (NW)	3	50	39	4	0,21	4,9	19	14,5	0,21	4,8
GS-3	SL-11	1 (NW)	2	45	33	3	0,11	9,1	30	21,1	0,09	10,6
GS-3	SL-1	2 (EW/S)	4	26	76	8	0,58	1,7	13	5,6	0,71	1,4
GS-3	SL-2	2 (EW/S)	2	54	31	3	0,17	5,8	18	14,6	0,14	7,3
GS-3	SL-8	2 (EW/S)	4	57	49	5	0,06	16,9	83	69,4	0,06	17,4
GS-3	SL-1	3 (EW)	3	34	55	6	0,42	2,4	13	7,3	0,41	2,4
GS-3	SL-5	3 (EW)	5	65	55	6	0,08	12,4	68	61,5	0,08	12,3
GS-4	SL-1	1 (EW)	9	70	99	10	0,12	8,6	85	79,8	0,11	8,9
GS-4	SL-3	1 (EW)	3	59	39	4	0,21	4,9	19	16,3	0,18	5,4
GS-4	SL-4	1 (EW)	11	59	124	12	0,40	2,5	31	26,6	0,41	2,4
GS-4	SL-5	1 (EW)	9	83	92	9	0,16	6,3	58	57,6	0,16	6,4
GS-4	SL-3	2 (NNW)	5	43	79	8	0,42	2,4	19	12,9	0,39	2,6
GS-4	SL-4	2 (NNW)	3	43	49	5	0,16	6,3	31	21,1	0,14	7,0
GS-4	SL-1	3 (EW/S)	2	52	23	2	0,03	37,0	85	66,7	0,03	33,4
GS-4	SL-4	3 (EW/S)	5	42	83	8	0,27	3,7	31	20,5	0,24	4,1

O fato de não haver ao menos duas fraturas de cada grupo em todas as *scanlines*, ou ainda, como se observa em alguns grupos, em nenhuma das *scanlines*, é um indício que, de maneira geral, todos os grupos possuem baixa densidade. Considerando todos os grupos de fraturas apresentados na tabela 6, os valores de densidade e de espaçamento variam de 0,03 a 0,58 (fraturas por metro) e 1,7 a 37,0 (metro), respectivamente; esses valores de densidade ajustam-se a uma distribuição logarítmica (figura 46-a). Assim, considera-se que não é adequado

trabalhar com média e desvio padrão para cada grupo de fraturas, pois a quantidade de dados é pequena e porque a distribuição da densidade, dentro de cada grupo, provavelmente também não é linear. A mediana e os quartis (25% e 75%) da densidade, para a distribuição que contempla os dados de todos os grupos de fraturas, são 0,11, 0,07 e 0,21, respectivamente. Quanto ao espaçamento em metros, a mediana e os quartis são, respectivamente, 8,8, 4,7 e 15,3.

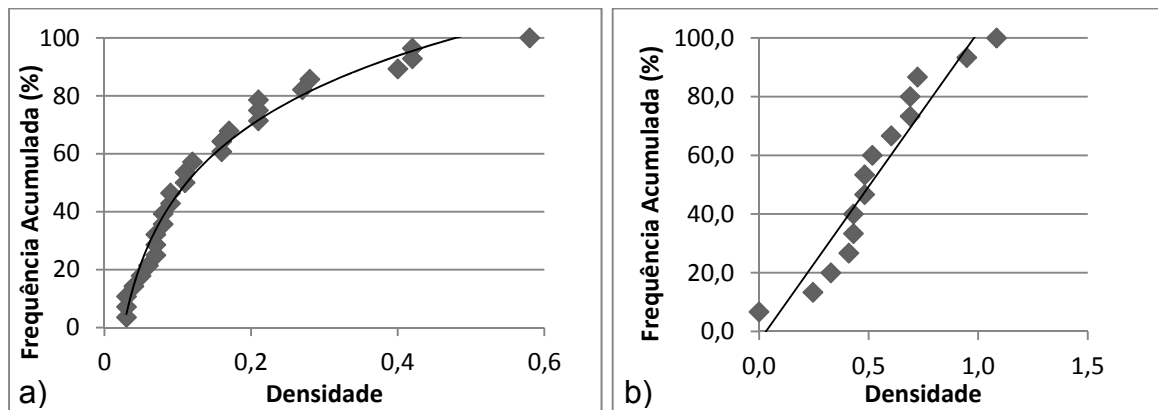


Figura 46 - Frequência acumulada dos valores de densidade (número de fraturas/metro) mostrando em (a) bom ajuste com distribuição logarítmica para os diversos grupos de fraturas em conjunto (valores de 25%, 50% e 75% de 0,07, 0,11 e 0,21, respectivamente) e em (b) melhor ajuste com distribuição linear (média = 0,5) para as fraturas de baixo ângulo da GS-1

A tabela 7 mostra os intervalos de valores (mínimo e máximo) para cada grupo por afloramento. Tomando como referência os valores mencionados da mediana e dos quartis, conclui-se que os grupos em ordem crescente de densidade (ou decrescente de espaçamento) são: NE/vertical (GS2), ENE/vertical (GS-1), E-W/médio norte (GS-2), E-W/médio sul (GS-4), NW/vertical (GS-3, GS-1), E-W/médio sul (GS3), E-W/vertical (GS3, GS4) e NW/vertical (GS4).

Excepcionalmente, para o grupo de fraturas de ângulo baixo da pedreira GS-1 (grupo 2), a densidade foi obtida a partir da contagem de fraturas em fotos, ao longo de linhas verticais, já que as scanlines horizontais realizadas em campo, sendo subparalelas a estas fraturas, proporcionam uma baixa amostragem de tais fraturas. Assim, elas foram contadas ao longo de 15 linhas verticais, nas paredes NE da pedreira, próximo às scanlines SL-2 e SL-6, bem como ao ponto B. De modo interessante, os valores de densidade (corrigidos pelo método de Terzaghi; o ângulo médio de mergulho é 14°) apresentam uma distribuição linear (figura 46-b), com um valor médio de 0,5 e igual ao da mediana.

Tabela 7 - Intervalo dos valores de densidade e de espaçamento (mínimo e máximo) para cada grupo de fraturas, por afloramento, de acordo com o método utilizado (Terzaghi, 1965 e Kiraly, 1970)

Pedreira	Grupo	Direção/ Mergulho	Qty. Scanlines	Densidade (frat./m)				Espaçamento (m)			
				Terzaghi		Kiraly		Terzaghi		Kiraly	
				Valor Mín.	Valor Max.	Valor Mín.	Valor Max.	Valor Mín.	Valor Max.	Valor Mín.	Valor Max.
GS-1	1	NW/vertical	5	0,07	0,28	0,08	0,32	3,6	13,7	3,1	14,1
GS-1	3	ENE/vertical	3	0,03	0,07	0,03	0,07	15,0	31,6	15,3	35,6
GS-2	4	NE/vertical	1	0,04	-	0,03	-	27,8	-	32,8	-
GS-2	5	EW/médio N	2	0,03	0,11	0,03	0,10	8,8	34,5	10,0	34,1
GS-3	1	NW/vertical	4	0,07	0,21	0,06	0,21	4,9	13,8	4,8	15,6
GS-3	2	EW/médio S	3	0,06	0,58	0,06	0,71	1,7	16,9	1,4	17,4
GS-3	3	EW/vertical	2	0,08	0,42	0,08	0,41	2,4	12,4	2,4	12,3
GS-4	1	EW/vertical	4	0,12	0,40	0,11	0,41	2,5	8,6	2,4	8,9
GS-4	2	NW/vertical	2	0,16	0,42	0,14	0,39	2,4	6,3	2,6	7,0
GS-4	3	EW/médio S	2	0,03	0,27	0,03	0,24	3,7	37,0	4,1	33,4

O espaçamento das fraturas que compõem as zonas de fraturas, presentes em determinados grupos, foi avaliado separadamente, e a tabela 8 apresenta, para os dados de *scanlines*, a comparação dos valores de espaçamento corrigido e não corrigido. Neste caso, utilizou-se apenas a correção de Kiraly (1970) pela simplicidade do método e, novamente, devem ser desconsiderados os espaçamentos das zonas que possuem α menor que 20° (NS/médio, SL-4 na GS-2; NW/vertical, SL-5 na GS-3; e EW/médio, SL-6 na GS-3). Sendo assim, verifica-se que os grupos que apresentam os menores e os maiores espaçamentos observados são NW/vertical (GS-1) e EW/vertical (GS-4), respectivamente. O grupo NW/vertical na GS-3 apresenta espaçamentos intermediários (0,11 a 0,47 m); e para os grupos EW/médio sul e EW/vertical, também na GS-3, foi analisado apenas uma zona de fratura para cada um, com espaçamento de 0,20 e 0,48 m, respectivamente.

Assim, os grupos que possuem zonas de fraturas (principalmente NW e E-W verticais) apresentam um padrão bimodal de espaçamento, uma vez que o espaçamento entre fraturas simples e entre zonas é de ordem métrica a decamétrica, enquanto o espaçamento dentro de uma zona é de ordem decimétrica a centimétrica.

Tabela 8 - Grupos com zonas de fraturas, observadas em *scanlines*, e o respectivo número de fraturas que constituem a zona, espessura e espaçamento (corrigidos pelo método de Kiraly e não corrigidos)

Pedreira	Grupo	Scanline	α	NºFrat	Espess.	Espaçamento (m)	Espess. Corr.	Espaçamento Corr. (m)
GS-1	NW/vertical	SL-1	33	3	0,5	0,17	0,3	0,09
GS-1	NW/vertical	SL-1	33	6	2,0	0,33	1,1	0,18
GS-1	NW/vertical	SL-3	19	3	0,6	0,20	0,2	0,07
GS-1	NW/vertical	SL-4	21	5	3,5	0,70	1,3	0,25
GS-1	NW/vertical	SL-5	20	15	24,0	1,60	8,2	0,54
GS-2	NS/médio E	SL-4	1	12	3,0	0,25	0,0	0,00
GS-3	NW/vertical	SL-5	5	6	3,0	0,50	0,3	0,05
GS-3	NW/vertical	SL-7	31	8	6,5	0,81	3,3	0,41
GS-3	NW/vertical	SL-8	49	8	1,2	0,15	0,9	0,11
GS-3	NW/vertical	SL-9	50	13	1,8	0,14	1,4	0,11
GS-3	NW/vertical	SL-11	45	9	6,0	0,67	4,2	0,47
GS-3	NW/vertical	SL-11	45	5	2,0	0,40	1,4	0,28
GS-3	EW/médio S	SL-6	4	5	7,0	1,40	0,6	0,11
GS-3	EW/médio S	SL-7	21	6	3,2	0,53	1,2	0,20
GS-3	EW/vertical	SL-5	65	3	1,6	0,53	1,4	0,48
GS-4	EW/vertical	SL-1	70	4	0,8	0,20	0,8	0,19
GS-4	EW/vertical	SL-1	70	4	2,0	0,50	1,9	0,47
GS-4	EW/vertical	SL-1	70	8	2,5	0,31	2,4	0,29
GS-4	EW/vertical	SL-3	59	7	6,5	0,93	5,6	0,80

4.3.2 Análise tectônica

Na análise tectônica, primeiramente, é apresentada uma avaliação dos modos de propagação e dos eventos tectônicos geradores dos principais grupos de fraturas, principalmente, com base em padrões geométricos de fraturas (ex., fraturas conjugadas ou fraturas paralelas) e em feições presentes nas superfícies das fraturas, tais como plumas e estrias. Em seguida, é apresentada uma discussão sobre a idade relativa de tais eventos. Os plano de falha observados, junto com suas estrias, citados no texto deste item, constam no estereograma da figura 47.

No grupo de direção geral NW e mergulho subvertical, presente em todos os afloramentos, observaram-se estrias na superfície de fraturas nas três pedreiras em que ele ocorre de forma proeminente, ou seja, na GS-1, GS-3 e GS-4. Nessas pedreiras, a maioria das estrias possui caimento em torno de 10° a 20°; porém, por vezes, foram verificados caimentos oblíquos com forte componente vertical (45° na

GS-3 e 70° na GS-4). Feições de pluma foram notadas em fraturas com direções distintas: N50W (GS-1), N10W (GS-3) e N4W (GS-4). Na fratura N10W da pedraira GS-3, o eixo da pluma é horizontal e foram observadas estrias que se distribuem em faixas polidas, alternadas com faixas não polidas. As faixas dispõem-se em leque e assemelham-se a feição do tipo *rib*, ou a uma parte de uma pluma. A ocorrência de estrias indica que houve propagação por cisalhamento e as feições ou pluma, por extensão; supondo que ambas as feições tenham sido geradas em um mesmo evento, conclui-se que a fratura é híbrida.

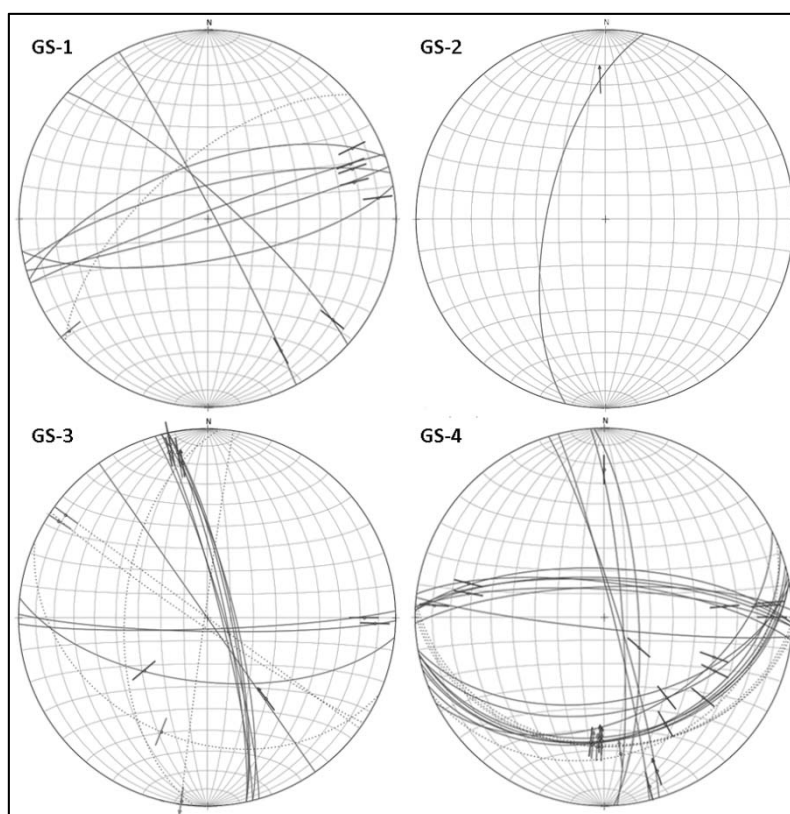


Figura 47 - Estereogramas com a representação de planos de falhas com suas respectivas estrias observadas, em cada um dos afloramentos

Também na GS-3, uma fratura do subgrupo de direção N30W apresentou indicador cinemático com sentido de movimento dextral, enquanto outra fratura do subgrupo de direção N10W apresentou indicador cinemático com sentido de movimento sinistral. Estes sentidos de deslocamento são coerentes com σ_1 de direção ao redor de N20W em regime tectônico transcorrente. Tendo os subgrupos sido gerados num mesmo evento, mais uma vez concluí-se que são fraturas conjugadas híbridas, pois o ângulo entre eles é de 20°.

Dentro da área de ocorrência das pedreiras, as direções dos esforços principais podem ter sofrido pequenas rotações. As direções no intervalo N15-65W na GS-1, podem ser um exemplo dessas variações locais, pois neste caso infere-se que o σ_1 possuía uma orientação em torno de N40W.

Com relação ao grupo de direção E-W e ângulo de mergulho entre 30° e 70°, na pedreira GS-3, apenas uma fratura de atitude 186/62 apresentou estrias com caimento de 54° e película mineral de coloração verde em sua superfície. Neste afloramento, a presença marcante de pares conjugados (fraturas E-W mergulhando em torno de 60° a 70°, ora para sul, ora para norte, figura 39-a), que fazem um ângulo entre si próximo de 60° a 40°, indica a atuação de regime normal (ou extensional) com σ_3 de direção N-S e σ_1 vertical. O ângulo de 40° entre os pares conjugados indica que parte destas fraturas são híbridas.

Conforme observado nas descrições do item anterior com relação às fraturas deste grupo, as com mergulho em torno de 30°, bem caracterizadas principalmente na pedreira GS-4, são típicas de regime de esforços de falhas inversas. Isto indica a atuação de regimes de esforços distintos para a geração das fraturas E-W. Na pedreira GS-3, existe uma dispersão contínua do ângulo de mergulho, que varia entre 40° e 70° observável no estereograma da figura 33. Isto sugere também uma variação contínua, ao longo do tempo para σ_1 , que passaria da situação vertical para a horizontal, ou vice versa (a ordenação cronológica será discutida mais à frente). A fratura 204/35, situada na extremidade do *trend*, apresenta estrias próximas ao rumo do mergulho e não foi incluída no grupo de ângulo médio, podendo ser considerada como uma falha inversa.

Na pedreira GS-4, oito fraturas com mergulho entre 35° e 53° apresentaram estrias bem marcadas com caimento próximo ao rumo do mergulho. Na superfície dessas fraturas, ainda se observam pequenas rampas (figura 48-a), ligando segmentos da fratura principal, com estrias bem marcadas oblíquas desde a superfície principal inferior da fratura até o final da rampa, sem continuar na superfície principal superior da fratura (figura 48-b), indicando deslocamento oblíquo provavelmente imposto pela presença das rampas. Com isso, conclui-se que as fraturas com mergulho predominante entre 30° e 40° (apenas as rampas apresentam mergulho maior) foram geradas em regime de esforços compressivo com σ_1 orientado para N-S.

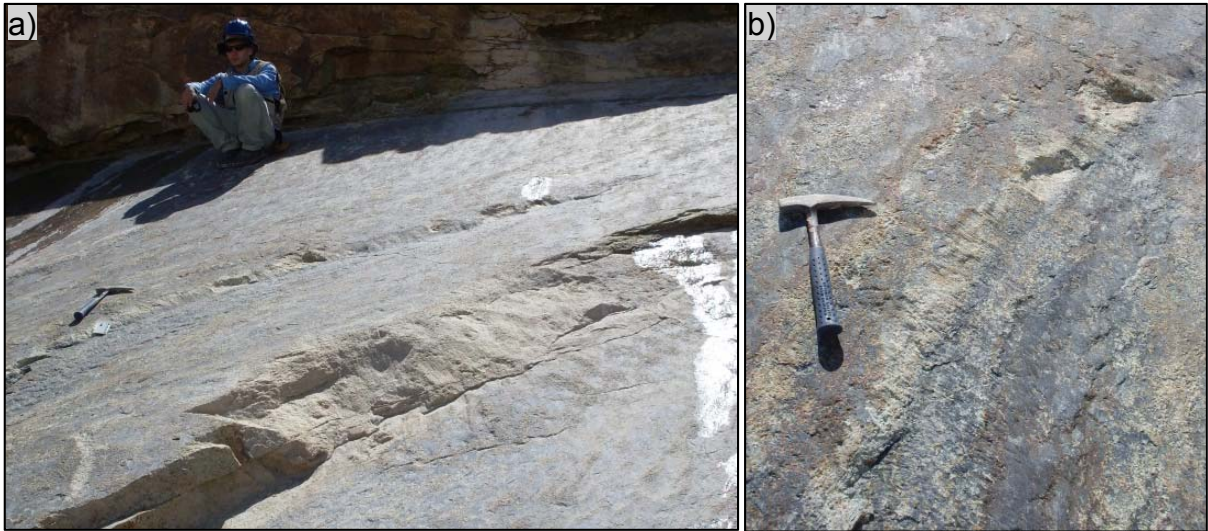


Figura 48 - GS4, ponto D: (a) fraturas 183/32 e 176/32 com estrias no rumo do mergulho, sendo conectadas por rampa (junto ao martelo); (b) detalhe da rampa com estrias oblíquas ao deslocamento inverso, que caracteriza a fratura de um modo geral

No grupo de direção E-W com mergulho subvertical, identificado nos afloramentos GS-3 e GS-4, foram encontradas estrias com caimento baixo, com valores entre 10° e 20° , em fraturas da GS-3 e entre 10° e 35° em fraturas da GS-4. A presença de estrias subhorizontais, a princípio, sugere que as fraturas foram geradas em regime transcorrente, podendo ser de cisalhamento ou híbridas; no entanto, as estrias podem ter sido geradas durante reativação de tais fraturas. Neste caso, existem quatro possibilidades quanto ao modo de propagação e regime de esforços que gerou as fraturas: (1) fraturas extensionais, de regime extensional; (2) fraturas extensionais, de regime transcorrente; (3) fraturas de cisalhamento, de regime transcorrente; ou (4) fraturas híbridas, também de regime transcorrente.

Entretanto, na GS-3, foi observada transição de mergulho médio para vertical, na extremidade superior de uma fratura de direção E-W (figura 38), como se da fratura de médio ângulo começasse a se propagar uma fratura de alto ângulo, ou vice versa. Isto é reforçado pelo fato das fraturas E-W subverticais de ângulo médio (em torno de 60°) apresentarem exatamente a mesma direção, sugerindo que houve uma mudança no modo de propagação das fraturas sob um mesmo regime tectônico, possível com a atuação de pressão de fluídos, ou seja: sob a atuação de esforços de maior magnitude seriam geradas fraturas de cisalhamento de mergulho em torno de 60° , no regime de falhas normais, levando a uma queda brusca na magnitude dos esforços. A seguir, a pressão de fluídos desloca o círculo de Mohr para a esquerda, até interceptar a envoltória no ponto T (em que $\sigma_3 = T -$

resistência da rocha à tração), sendo então geradas as fraturas E-W extensionais. Esta é uma hipótese plausível, pois as fraturas E-W subverticais constituem um grupo de fraturas com muito pequena variação na sua direção em toda pedreira GS-3, sendo coerente com o padrão de fraturas extensionais. Já na GS-4 observam-se dois subgrupos, um ENE e outro EW, com um ângulo ao redor de 20° entre eles, sugerindo variação na direção σ_3 .

Desta forma, as fraturas E-W, subverticais, são provavelmente fraturas extensionais, formadas no mesmo regime extensional que gerou as fraturas E-W de mergulho médio. Em algumas dessas fraturas E-W subverticais da GS-3 foi observado material de preenchimento, o que é coerente com a geração através do modo I. Ainda sobre este material, verificou-se a presença de estrias subhorizontais, indicando, portanto, que houve reativação transcorrente.

Outro grupo presente em alguns dos afloramentos, mas que ocorre de forma bastante restrita, é o de direção NE e mergulho subvertical (GS-3) ou superior a 60° (GS-2). Conforme discutido no item anterior, o grupo ENE com mergulho subvertical da GS-1, apesar da sua proximidade de direção com as fraturas E-W, provavelmente, está geneticamente relacionado com as fraturas NE da GS-2 e da GS-3. Nestas últimas, não foram observadas nenhuma feição superficial, ao contrário do que ocorreu na GS-1, onde várias fraturas de direção N60-90E apresentaram estrias com ângulo entre 15° e 20° e outra com direção N50E apresentou estrias com caimento de 6° (figura 47). O mergulho subvertical das fraturas as estrias de baixo mergulho indicam atuação de regime transcorrente.

Com relação às fraturas com mergulho entre 3° e 22°, proeminentes na GS-1 (grupo 2), estas não apresentavam superfícies suficientemente expostas para a observação de feições que pudessem auxiliar no diagnóstico do seu modo de propagação (e.g. estrias, indicadores de movimento e plumas). A julgar pelo mergulho, considera-se que essas fraturas podem ser fraturas extensionais ou fraturas híbridas de regime de falhas inversas (compressivo). Apesar da dispersão da direção observada, típica de estruturas de baixo ângulo, verifica-se que, desconsiderando as fraturas com mergulho inferior a 10°, há uma tendência de predomínio da direção NNE. Sendo assim, o σ_1 deveria ter, mais provavelmente, direção WNW. Subordinadamente, há fraturas com direção ao redor de N50W.

Os dois grupos de fraturas de direção N-S, exclusivos da GS-2, possuem ângulo de mergulho médio e em sentidos opostos, sendo aproximadamente

perpendiculares entre si. As fraturas com mergulho para oeste ocorrem associadas a veios e à foliação do granito, sendo que uma delas apresenta estrias, com caimento de 27°, e movimento sinistral, indicado por degraus de superfície de falha marcados pelo preenchimento de quartzo (figura 49). Estas estrias sugerem que as paredes dos veios foram reativadas por evento transcorrente com σ_1 de direção NW, possivelmente, correspondente ao que gerou as fraturas híbridas subverticais de direção NW-NNW. A ortogonalidade das fraturas N-S com mergulho para leste, com relação às que mergulham para oeste, é uma evidência que descarta se tratarem de fraturas conjugadas, no entanto, sugere que estes dois grupos estejam geneticamente relacionados; isto é reforçado pelo fato destes grupos serem exclusivos da pedreira GS-2. No entanto, o mecanismo que proporcionou esta relação é desconhecido.



Figura 49 - Pedreira GS-2, SL2: fratura N-S com mergulho médio para oeste (atitude 282/65) com estrias (caimento de 27 para N2E); os degraus no preenchimento de quartzo indicam movimento sinistral

A avaliação dos modos de propagação e dos esforços atuantes na geração de cada um dos principais grupos de fraturas encontrados nos quatro afloramentos estudados, indicam a atuação de quatro regimes tectônicos distintos. São eles:

- 1) Regime transcorrente com σ_1 N20-40W, gerou fraturas híbridas de direção NW, subverticais, aqui denominado de T- σ_1 NW;
- 2) Regime extensional com σ_3 N-S, gerou fraturas de cisalhamento (mergulho em torno de 60°) e extensionais, subverticais, ambas de direção E-W, é denominado de E- σ_3 N-S;
- 3) Regime compressivo com σ_1 N-S, gerou fraturas de cisalhamento de direção E-W e mergulho em torno de 30°, é denominado de C- σ_1 N-S;

4) Regime compressivo com σ_1 de direção WNW, gerou fraturas de baixo ângulo de mergulho (inferior a 30°) e direção dispersa, mas tendendo para NNE, denominado de C- σ_1 WNW.

Possivelmente, houve ainda a atuação de outro regime tectônico, provavelmente transcorrente, responsável pela formação de fraturas de direção NE e mergulho subvertical. A tabela 9 compõe uma sistematização das principais características descritas para cada grupo de fratura identificado nos afloramentos.

A fim de se determinar a idade relativa dos diferentes regimes tectônicos atuantes, a interação entre as fraturas foi analisada, principalmente, com relação às suas terminações. Considerando a abundância de fraturas subverticais, observações em planta, ou seja, no chão, seriam mais favoráveis para a determinação de tais interações do que as observações realizadas em paredes. Porém, neste trabalho, não foram encontradas exposições horizontais. Sendo assim, a observação das interações entre as fraturas subverticais não foi favorecida. No entanto, as paredes favoreceram a observação das interações entre fraturas com ângulos de mergulho médios e baixos.

A principal relação verificada entre os grupos de fraturas da pedreira GS-1 foi que, frequentemente, as fraturas de direção NW subverticais (evento T- σ_1 NW) terminam nas fraturas do grupo de baixo ângulo (figura 50; evento C- σ_1 WNW), indicando que as fraturas NW são mais jovens. O mesmo controle foi observado, com menor frequência, nas fraturas de direção ENE e mergulho entre 60° e 90° , relacionadas ao evento que gerou as fraturas NE da GS-2 e GS-3.

Tabela 9 - Síntese dos principais grupos de fraturas identificados em afloramentos e suas características quanto ao espaçamento, feições indicativas de fluxo, modo de propagação, regime de esforços e orientação dos esforços principais

Grupo	Aflor.	Atitude Média	Espaçamento Frat. Simples	Espaçamento Zona de Frat.	Feições Indicativas de Fluxo	Tipo de Fratura	Regime de Esforços	Orientação de Esforços
Subhorizontal	GS-1	N70W/16°SW	-	-	Alt. ocre/halos de alt./vegetação/escoamento	Cisalhamento (falha inversa)	Compressivo	σ_1 horiz./ σ_3 vert. σ_1 WNW(?)
N-S/médio	GS-2	N-S/45°E	-	-	Ausente	?	?	?
	GS-2	N-S/55°W	-	-	Ausente	Reativação (veios)	Transcorrente (?)	σ_1 e σ_3 horiz. σ_1 N20W
NW/vertical	GS-1	N40W/89°SW	3,6 - 13,7	0,07 - 0,54	Alt. ocre/vegetação	Híbrida	Transcorrente	σ_1 e σ_3 horiz. σ_1 N20W
	GS-2	N25W/75°NE	-	-	Alt. Ocre			
	GS-3	N30W/85°NE	4,9 - 13,8	0,11 - 0,47	Alt. Ocre			
	GS-4	N20W/85°NE	2,4 - 6,3	-	Alt. Ocre			
E-W/ vertical	GS-3	E-W/85°S	2,4 - 12,4	0,48	Alt. Ocre	Extensional	Normal	σ_1 vert./ σ_3 horiz. σ_1 N-S
	GS-4	N85E/85°NW	2,5 - 8,6	0,19 - 0,80	Alt. ocre/halos de alt./vegetação/r. Friável			
E-W/médio	GS-2	N85W/45°NE	8,8 - 34,5	-	Alt. ocre pontual	Cisalhamento (falha normal)	Normal	σ_1 vert. / σ_3 horiz. σ_1 N-S
	GS-3	N85W/60°SW	1,7 - 16,9	0,20	Ausente			
	GS-4	N80E/55°SE	3,7 - 37,0	-	Alt. ocre incipiente			
E-W/baixo	GS-4	N85E/30°SSE	-	-	Ausente	Cisalhamento (falha inversa)	Compressivo	σ_1 horiz./ σ_3 vert. σ_1 N-S
NE/vertical	GS-1	N75E/85°NW	15,0 - 31,6	-	Raramente com alt. ocre	Reativação (veios)	Transcorrente (?)	σ_1 e σ_3 horiz. σ_1 N35E a N55E(?)
	GS-2	N55E/70°SE	27,8	-	Ausente	Extensional ou Cisalhamento (?)		
	GS-3	N35E/85°NW	-	-	Intensa alt. terrosa/ r. friável			



Figura 50 - GS-1, próximo ao ponto B: fraturas de direção NW subverticais terminam nas fraturas de baixo ângulo da GS-1, indicando que as fraturas NW são mais jovens (notar alteração ocre das fraturas NW, e fratura NE de alto ângulo, no canto esquerdo da foto, quase sem alteração)

Na pedreira GS-2, não foi verificada nenhuma interação entre as fraturas. Diferentemente, na pedreira GS-3, foi observada a maior quantidade de interações entre os grupos de fraturas, as quais podem ser verificadas na figura 38. Nota-se que parte das fraturas verticais, de direção N30W (evento T- σ_1 NW), terminam nas fraturas de ângulo médio ($\sim 60^\circ$) e direção E-W (evento E- σ_3 N-S; à esquerda da figura 38), indicando que as NW foram geradas após a formação das fraturas E-W. Além disso, uma fratura ENE (204/35), compatível com evento compressivo gerador de falhas inversas (evento C- σ_1 N-S), termina em fratura NNW de atitude 74/83 (evento T- σ_1 NW; figura 51-a). Quanto às relações entre os grupos de fraturas da pedreira GS-4, verificou-se que fratura de direção NNE e mergulho de 30° (284/28) do evento C- σ_1 WNW termina em fratura E-W de mergulho elevado (3/78) do evento E- σ_3 N-S, indicando que as de mergulho baixo são mais jovens (figura 51-b).

Assim, as relações de terminação de fraturas indicam, do mais antigo para o mais jovem, a seguinte superposição de eventos apresentada na tabela 10. Quanto ao evento que gerou as fraturas NE subverticais, há evidência de que este seja posterior ao evento C- σ_1 WNW (fraturas NE terminam nas fraturas de baixo ângulo na GS-1; figura 50); no entanto, por não ter sido possível identificar a direção de seus esforços principais, tal evento não foi incluído na tabela.

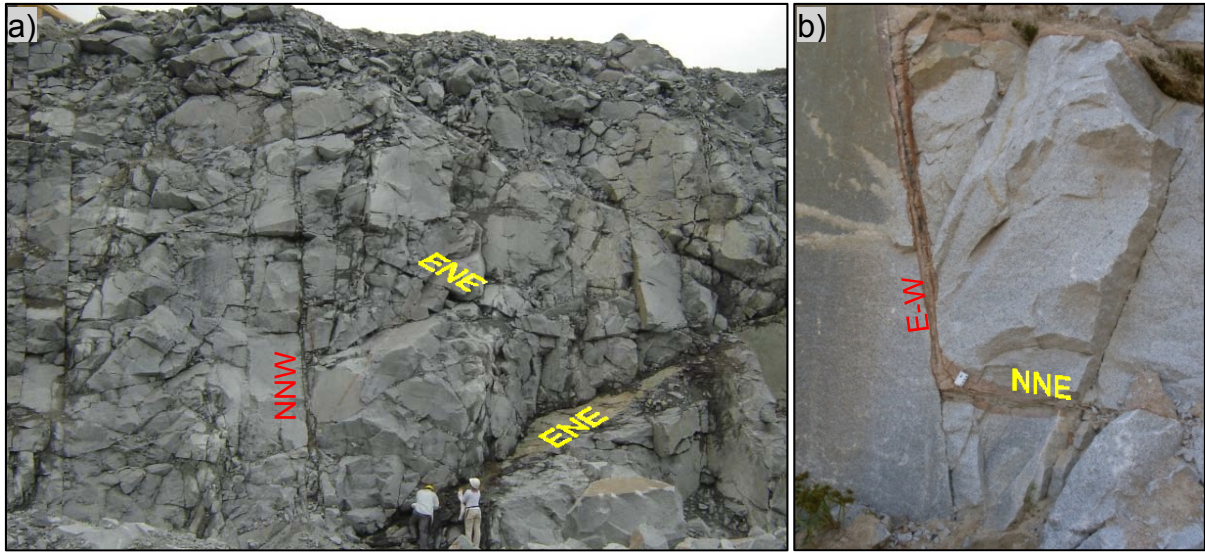


Figura 51 - (a) GS-3, vista da SL-4: fratura ENE (204/35) do evento C- σ_1 N-S, gerador de falhas inversas, termina em fratura NNW (74/83) do evento T- σ_1 NW; (b) GS-4, SL-3: fratura de direção NNE e mergulho baixo (284/28) do evento C- σ_1 WNW termina em fratura E-W de mergulho elevado (3/78) do evento E- σ_3 N-S; ambos os casos indicam que as fraturas de mergulho baixo são mais jovens

Tabela 10 - Ordem cronológica (do antigo mais para o mais jovem) dos principais eventos tectônicos identificados por meio da análise dos grupos de fraturas encontrados nos afloramentos

Evento	Estruturas
E- σ_3 N-S	fraturas de cisalhamento ou híbridas (mergulho em torno de 60°), e extensionais subverticais, ambas de direção E-W. As subverticais apresentam estrias de baixo ângulo que devem ter resultado de reativação por evento posterior (T- σ_1 NW ou pelo evento gerador das fraturas NE)
C- σ_1 WNW	fraturas de baixo ângulo de mergulho (inferior a 30°) e direção dispersa, mas tendendo para NNE
T- σ_1 NW	fraturas NW a NNW subverticais, híbridas
C- σ_1 N-S	fraturas de cisalhamento de direção E-W e mergulho em torno de 30°

4.3.3 Comparação dos eventos tectônicos com os descrito na literatura

Na tentativa de verificar se existem relações dos eventos tectônicos identificados neste trabalho com os eventos neotectônicos, é feita, em seguida, uma comparação com o que é descrito na literatura.

Verifica-se que dos eventos tectônicos aqui identificados, apenas o de regime transcorrente e σ_1 com direção NW está presente na revisão de trabalhos anteriores,

onde foi identificado por diversos autores durante o Pleistoceno (tabela 1). Contudo, a presença de um dique centimétrico delimitado por fratura de atitude 57/88 pertencentes a um zona de fratura da pedreira GS-3, sugere que as estruturas deste evento tenham sido geradas, sincronicamente, às atividades magmáticas que originaram o dique; é bastante marcante que tais zonas de fraturas são as mais contínuas e planas, indicando que podem se tratar de fraturas muito profundas. Sabe-se que no contexto geológico da área de estudo ocorreram dois eventos magmáticos importantes: o primeiro corresponde ao magmatismo basáltico que originou os derrames diabásicos do Serra Geral na Bacia do Paraná, durante o Cretáceo Inferior; o seguinte se trata do magmatismo alcalino de idade mesozoica-cenozoica, e que atuou até o Paleógeno (Eoceno), durante o período de maior desenvolvimento do RCSB (Riccomini *et al.* 2004). Sendo assim, não se pode correlacionar o evento T- σ_1 NW com aquele descrito no Pleistoceno. Como a composição do dique não foi determinada, só é possível afirmar que a idade máxima para este evento corresponde ao Cretáceo Inferior. Consequentemente, os eventos anteriores, E- σ_3 N-S e C- σ_1 WNW, podem ter ocorrido no Paleozoico ou no Mesozoico. O fato de não haver estruturas semelhantes àquelas geradas em tais eventos (falhas normais E-W e inversas NNE, respectivamente), descritas na literatura para o Mesozoico-Cenozoico e Cenozoico, reforça a afirmação anterior.

Quanto ao evento, C- σ_1 N-S, posterior ao T- σ_1 NW, Jacques (2013) descreve um evento T- σ_1 N-S no Cretáceo Inferior, relativo à abertura do Atlântico, ao qual o evento C- σ_1 N-S pode estar associado, pois eventos transcorrentes podem desenvolver regiões em compressão e extensão. Neste caso, o evento T- σ_1 NW poderia ser considerado ainda anterior, com idade máxima no Jurássico. No entanto, o evento C- σ_1 N-S ainda poderia ser correlacionado a evento transcorrente e com σ_1 de direção N-S, interpretado como pleistocênico, descrito por Fernandes & Amaral (2002).

4.4 Dados de Perfilagens Geofísicas

4.4.1 Comparação dos Resultados Obtidos pelas Diversas Técnicas de Perfilagem

Quando diversas técnicas de perfilagem são utilizadas em um mesmo poço, os resultados obtidos devem ser apresentados lado a lado, para comparar as

diferentes respostas que uma determinada característica do aquífero produz, em cada uma das perfilagens realizadas. Entretanto, a escala ideal para essa comparação não é compatível com a escala de representação das perfilagens óptica e acústica, pois estas necessitam de uma escala de maior detalhe para que as feições da rocha sejam observadas. Deste modo, as imagens obtidas através das perfilagens OTV e ATV, assim como as fraturas identificadas por meio destas, e sua classificação de espessura aparente e relação com a foliação, para os quatro poços perfilados, constam no anexo 2. Por sua vez, os perfis de litologia (com base nas descrições dos registros do DAEE), cáliber mecânico e acústico, temperatura, condutividade elétrica, radiação gama e vazão se encontram nas figuras 52, 53, 54 e 55, situadas mais abaixo neste texto. Nestes perfis, também se pode observar, em forma de *tadpoles*, as fraturas identificadas e suas classificações de acordo com três parâmetros distintos: vazão (com base nos resultados de diferenças de vazões entre uma medida e outra), espessura aparente e relação com a foliação.

Primeiramente, serão feitas algumas considerações com relação às imagens obtidas com os perfis OTV e ATV do anexo 2. No geral, as imagens da perfilagem óptica estão bastante prejudicadas, devido à uma coloração em tons de laranja a marrom verificada em todos os poços e que não é própria da rocha. Apenas nos poços 256 e 1204, observam-se pequenos trechos com a coloração verdadeira da rocha. Nos dois poços, verificou-se que a coloração alaranjada se inicia a partir de uma determinada fratura, numa profundidade de aproximadamente 108 m, no poço 256, e de 125 m, no poço 1204. O poço 256 foi o único em que esta perfilagem foi interrompida, numa profundidade em torno de 128 m, pois acreditou-se que não seria possível visualizar nenhuma feição da rocha. Ao contrário do esperado, no poço 1204, onde a perfilagem foi executada até o final, houve uma diminuição na intensidade da coloração alaranjada, a partir de 212 m de profundidade, onde se pode observar os bandamentos da rocha. No poço 1346, também é possível visualizar o bandamento, mesmo com a interferência da coloração alaranjada. Turbidez da água ou oxidação da parede do poço são possíveis causas para essa coloração; porém, sabendo que alguns aspectos da rocha podem ainda ser observados, mesmo que não nitidamente, considera-se que a segunda causa é a opção mais provável. As imagens da perfilagem acústica não apresentam este tipo de problema e, por isso, foram essenciais para complementar a identificação de fraturas neste trabalho.

As observações adiante, se referem aos resultados das figuras 53, 54, 55 e 56, cuja legenda de tais figuras se encontra na figura 52. As perfilagens cáliber, mecânico e acústico, estão sobrepostas num mesmo perfil. Conforme dito anteriormente (itens 3.4.2 e 3.4.3), estas perfilagens possuem um papel importante na identificação de zonas fraturadas e na classificação da espessura aparente das fraturas, que foi satisfatoriamente utilizada no presente estudo. Além disso, o cáliber mecânico (realizado antes do acústico) foi fundamental na identificação de certos aspectos construtivos dos poços, como: posição do revestimento, variações no diâmetro de perfuração do poço e profundidade total, que nem sempre correspondiam ao que estava descrito na sua ficha cadastral, conforme se observa na tabela 11. É relevante conhecer as reais condições dos aspectos construtivos dos poços, principalmente quando há variações no seu diâmetro, para que sejam tomados os devidos cuidados tanto na determinação das atitudes das fraturas e dos valores de vazão, quanto durante a execução de perfilagens com centralizadores, como OTV, ATV e *flowmeter*, de modo a evitar o aprisionamento da sonda.

Tabela 11 - Principais aspectos construtivos dos poços, com base no arquivo do DAEE e também pelo cáliber mecânico para os poços 255, 256, 1204 e 1346

Projeto	Poço	Diâm. Tubo	Prof. Tubo [m]		Prof. Total [m]		Total Perfilado [m]	Diam. c/ 10" [m]	Diam. c/ 8" [m]	Diam. c/ 6" [m]
			DAEE	Cáliber	DAEE	Cáliber				
GS	255	6"	8	28	300	225	198	28 - 81	81 - 122	122 - 225
GS	256	6"	64	67	300	223	156	-	67 - 154	154 - 223
GS	1204	4"	51	51	261	257	207	-	-	51 - 257
GS	1346	6"	34	61	184	176	115	-	-	61 - 176
JB	1501	6"	77	-	150	-	70	-	-	77 - 150
JB	1502	6"	73	-	200	-	102	-	-	73 - 200
JB	1503	6"	121	-	258	-	90	-	-	121 - 258
JB	1249	6"	37	-	204	-	143	-	-	37 - 204
JB	691	6"	43	-	144	-	82	-	-	43 - 144
JB	692	6"	37	-	200	-	152	-	-	37 - 200

Litologia		Tadpoles		
	Sedimentos Quaternários	Vazão Relativa	Espessura Aparente	Foliação Paralela
	Saprólito	● Sem Vazão Significativa	● Estreita	● Sem foliação
	Bt-Gnaiss	● Vazão Baixa	● Pouco espessa	● Foliação paralela
		● Vazão Moderada	● Espessa	
		● Vazão Alta	● Muito Espessa	
		● Vazão Muito Alta		

Figura 52 - Legenda da litologia e dos *tadpoles* das figuras 53 a 56

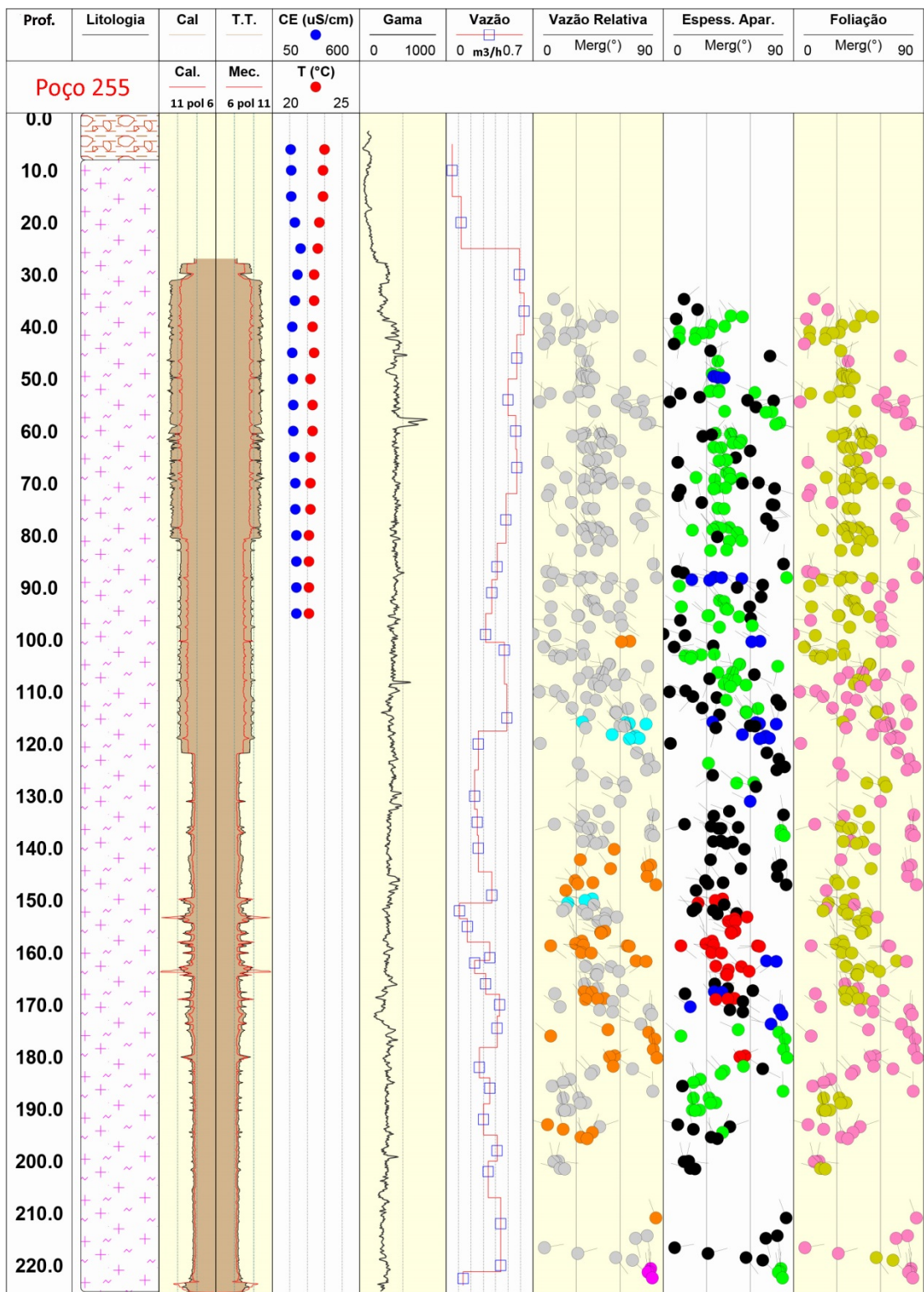


Figura 53 - Perfis de litologia, cáliper mecânico (vermelho) e acústico (preto), T e CE, vazão e *tadpoles*, com as classificações de transmissividade, espessura aparente e relação com a foliação, para o poço 255; o revestimento vai até a profundidade de aproximadamente 28 m

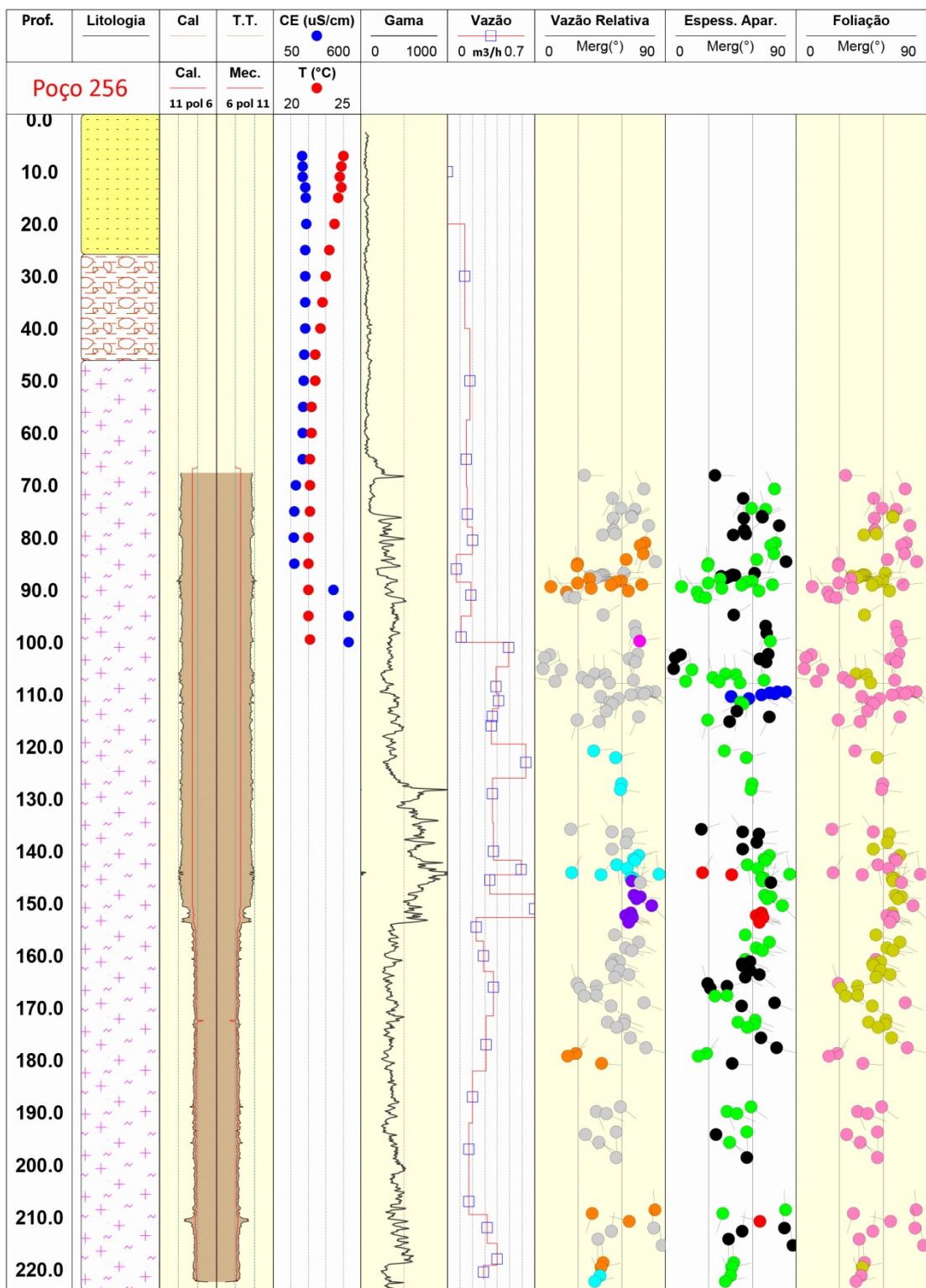


Figura 54 - Perfis de litologia, cáliper mecânico e acústico, T e CE, vazão e *tadpoles*, com as classificações de transmissividade, espessura aparente e relação com a foliação, para o poço 256; o revestimento vai até a profundidade de aproximadamente 67 m

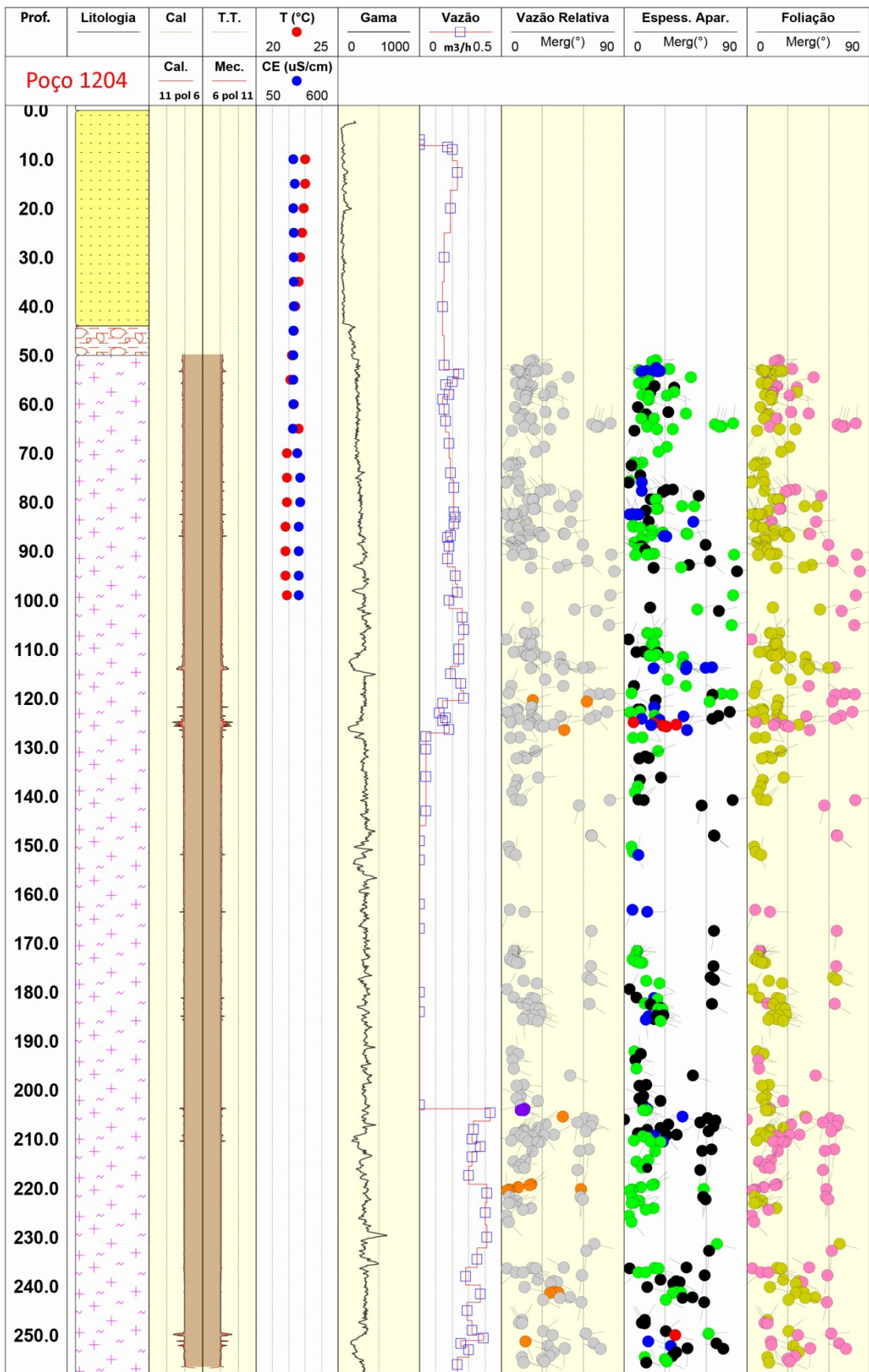


Figura 55 - Perfis de litologia, cáliper mecânico e acústico, T e CE, vazão e *tadpoles*, com as classificações de transmissividade, espessura aparente e relação com a foliação, para o poço 1204; o revestimento vai até a profundidade de aproximadamente 51 m

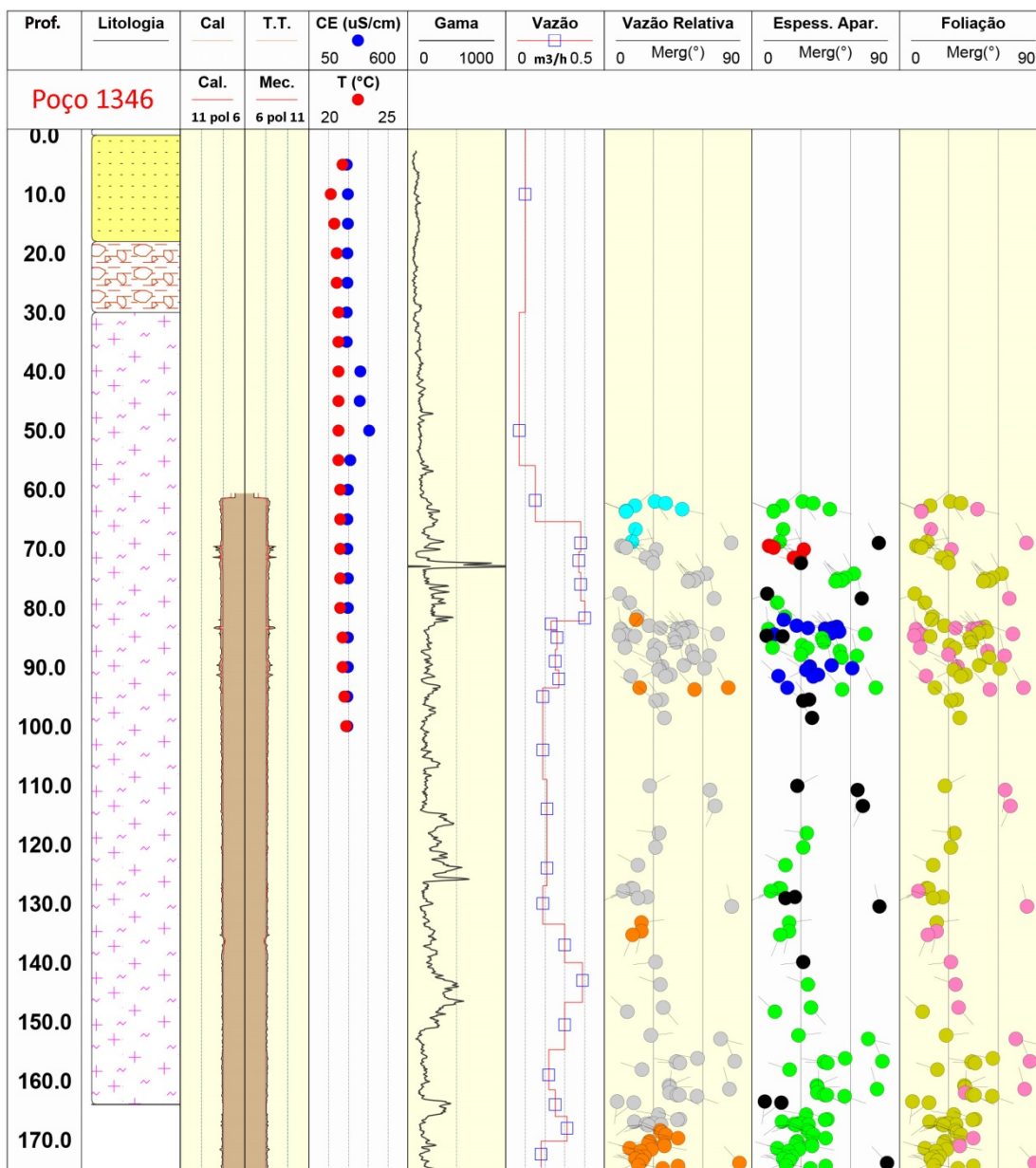


Figura 56 - Perfis de litologia, cáliper mecânico e acústico, T e CE, vazão e *tadpoles*, com as classificações de transmissividade, espessura aparente e relação com a foliação, para o poço 1346; o revestimento vai até a profundidade de 61 m

Neste trabalho, as perfilagens de temperatura e condutividade elétrica da água possuem uma limitação na sua profundidade, devido ao comprimento do cabo utilizado, de apenas 100 m. De modo geral, os valores de T e CE não apresentaram grandes variações ao longo de cada poço, havendo uma maior variação apenas no poço 256. Como essas perfilagens são utilizadas para identificar intervalos do poço em que há fluxo e possíveis locais de entrada e saída de água, é interessante verificar se existem correlações com as variações da vazão. No poço 255, observa-se que há uma discreta diminuição de T e aumento de CE até ~30 m de

profundidade, próximo ao limite do revestimento; a partir desta, tais parâmetros se tornam praticamente constantes. Através do perfil de vazão, observa-se o estabelecimento de um fluxo com vazão relativamente alta a partir da profundidade em questão. É provável que a presença desse fluxo seja responsável pelos valores constantes de T e CE. No poço 256, os valores de T diminuem até a profundidade de ~45 m e, a partir desta, mantêm-se constantes até o final; enquanto a CE aumenta, ligeiramente, até ~15 m, tornando-se constante até ~70 m, onde diminuem um pouco até ~85 m e, então, aumentam bruscamente. De acordo com o perfil de vazão, existem variações tanto em ~45 m, no revestimento, quanto em ~85 m, onde há a presença de fraturas pouco transmissivas. No poço 1204, a T apresenta duas diminuições, uma a ~35 m, no revestimento, e outra a ~70 m; o perfil de CE mantêm-se constante até ~70 m, onde ocorre um ligeiro aumento. Porém, em nenhuma dessas profundidades, observa-se uma variação significativa da vazão; uma possível explicação para isto é que existem locais com entradas e/ou saídas de água suficientes para alterar a temperatura e condutividade da água, mas que não resulta em variação significativa da vazão. No poço 1346, os valores de T são constantes no intervalo ~28 m a ~82 m, sofrendo ligeiro aumento nos intervalos restantes, superior e inferior; a CE se mantém constante, exceto no intervalo entre ~40 e ~50 m, onde os seus valores são superiores às demais profundidades. Esta variação de CE pode ter relação com a variação da vazão, observada pouco abaixo de 50m. Os resultados apresentados demonstram que, num mesmo perfil, geralmente os valores de T e CE não variam da mesma forma; às vezes, apenas um deles se mantém constante, enquanto o outro varia, sendo diferente do esperado na presença de fluxo (em que ambos parâmetros se manteriam constantes). Considera-se que utilizando apenas estas perfilagens, sem o auxílio dos valores de vazão, não é possível afirmar, com certeza, quais intervalos onde estes parâmetros ocorrem de forma constante realmente indicam a presença de fluxo, e quais locais onde eles variam representam entrada ou saída de água.

Com relação aos perfis de radiação gama, observa-se uma nítida variação nos seus valores quando se passa da porção constituída por rochas da bacia sedimentar para a porção do embasamento, havendo um aumento da radiação. Porém, especificamente para as rochas do embasamento, não foi identificada uma assinatura gama que auxiliasse na distinção das porções gnáissicas, xistosas e pegmatíticas. Aparentemente, os picos de radiação presentes na porção do

embasamento não possuem correlação com nenhuma feição específica, pois a maior parte das variações observadas não é relacionável a nenhum dos parâmetros analisados. Entretanto, pontualmente, tais picos (máximos ou mínimos) coincidem com locais onde há variação de vazão e que, frequentemente, também possuem aumento da espessura indicada pelo calíper, por exemplo: nas profundidades em torno de 128, 142, 144 e 153 m, no poço 256; 113, 125, 250 m, no poço 1204; e 82 m, no poço 1346. Apesar de não ser um resultado conclusivo, é possível que locais de maior abertura, onde ocorre entrada ou saída de fluxo, exerça alguma influência neste parâmetro.

Todas as medidas realizadas com o *flowmeter*, nos poços de estudo, indicaram a ocorrência de fluxo natural ascendente. Sendo assim, para identificar se determinada variação na vazão é causada por entrada ou saída de água, sugere-se que o perfil de vazão seja avaliado no mesmo sentido do fluxo, ou seja, de baixo para cima; então, se a vazão numa dada profundidade for maior do que a vazão na profundidade logo abaixo, significa que houve entrada de água através das fraturas neste intervalo e, se for menor, houve saída de água. Discussões detalhadas dos resultados obtidos através do *flowmeter*, principalmente com relação à identificação das fraturas mais favoráveis ao fluxo, constam no item 4.4.3.

Os perfis de *tadpoles* representam as fraturas identificadas, de modo que o seu prolongamento (traço que sai do círculo preenchido) indica o rumo do mergulho e a sua posição no perfil indica o ângulo de mergulho, que aumenta da esquerda para a direita (0° a 90°). Este tipo de perfil é vantajoso, pois permite a visualização da distribuição das fraturas com a profundidade. Além disso, a utilização de vários perfis de *tadpoles*, lado a lado, possibilita que sejam comparadas diferentes características de uma mesma fratura. As considerações a respeito da distribuição das fraturas com a profundidade e sobre a sua classificação quanto à espessura aparente e vazão serão feitas nos itens 4.4.2 e 4.4.3, respectivamente.

4.4.2 Análise dos dados de fraturas

Uma primeira análise que pode ser feita com relação aos dados de fraturas obtidos através das perfilagens OTV e ATV consiste na avaliação da distribuição das fraturas por profundidade. Conforme mencionado anteriormente, para esta

avaliação, podem ser utilizados os perfis de *tadpoles* apresentados acima. Sendo assim, através das figuras 53, 54, 55 e 56, observa-se que, em todos os poços, as fraturas se apresentam amplamente distribuídas ao longo de todo o perfil. Muitas vezes, os *tadpoles* mostram certa aglomeração de fraturas, que podem ser de atitudes semelhantes (mesmo grupo) ou distintas. O que se verifica é que a distribuição dessas zonas de fraturas variam de poço para poço.

No poço 255, as zonas de fraturas ocorrem intensamente até a profundidade de ~200 m, onde se tem uma diminuição das fraturas. As aglomerações de fraturas nos demais poços ocorrem em intervalos melhor definidos, verificando-se uma ocorrência de trechos com menor frequência de fraturas; são eles: entre 115 e 135 m e entre 180 e 220 m, no poço 256; entre 140 e 170 m, no poço 1204; e entre 100 e 150 m, no poço 1346. Essas variações também podem ser observadas através de histogramas de frequência, como os da figura 57. Com relação às fraturas com ângulo de mergulho menor que 30°, a maior e a menor ocorrência se dão, respectivamente, nos poços 1204 e 256; neste último, elas ocorrem, principalmente, num pequeno intervalo entre 85 e 110 m. Verifica-se que, no poço 255, a frequência dessas fraturas, em relação às demais, claramente diminui a partir de 120 m, passando a ser maior entre 180 e 205 m; porém, o mesmo não ocorre nos poços 1204 e 1346, de modo que elas estão presentes em todos os intervalos com maior aglomeração de fraturas.

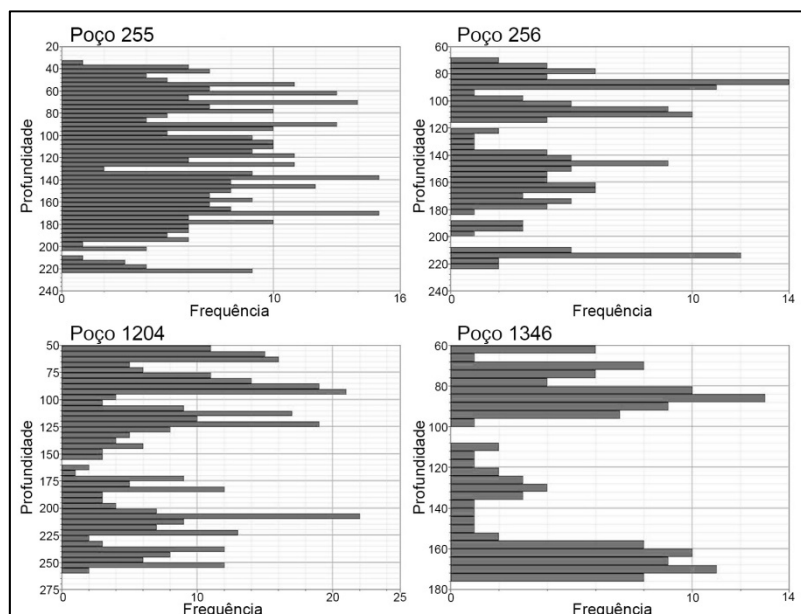


Figura 57 - Histogramas de fraturas X profundidade, realizados separadamente para cada poço

As fraturas identificadas também foram plotadas em estereogramas, separadamente para cada poço, para a identificação dos principais grupos de fraturas (figura 58). Nesta figura, encontram-se, ainda, estereogramas somente com as fraturas paralelas à foliação.

Verifica-se que, em todos os poços, o grupo principal (grupo 1) é constituído pelas fraturas paralelas à foliação. De maneira geral, as fraturas deste grupo possuem intensa dispersão de direção e mergulho; entretanto, esta dispersão ocorre de forma distinta em cada poço. Tal padrão é explicado pelo fato da foliação encontrar-se dobrada e de cada poço fornecer dados bastante locais. Em quatro poços, 255, 1501, 1249 e 692, este grupo foi subdividido em 1-a e 1-b. Esta divisão é importante, principalmente para o cálculo do espaçamento, o qual utiliza o polo médio do grupo de fraturas.

Uma análise detalhada da dispersão das fraturas paralelas à foliação pode ser observada na figura 59. Nela, as fraturas foram agrupadas de acordo com o projeto, GESOL ou Jurubatuba, em que tais dados foram obtidos. Vale ainda salientar que, conforme se observa no mapa de localização dos poços (figura 11), os quatro poços do projeto GESOL (255, 256, 1204 e 1346) encontram-se bastante próximos entre si, enquanto os poços do projeto Jurubatuba (1501, 1502, 1503, 1249, 691 e 692) apresentam-se mais espalhados na área de estudo.

Na figura 59, verifica-se que as fraturas paralelas à foliação, obtidas através do projeto GESOL, formam um padrão mais definido do que aquelas obtidas no projeto Jurubatuba. No primeiro caso, observa-se uma tendência da direção em todo o terceiro quadrante (histograma) e, apesar de dispersas, há um predomínio para NNE e NE. Subordinadamente, também ocorrem direções NW e NNW. Quanto ao mergulho, as fraturas podem apresentar desde ângulos subhorizontais até 70°, predominando valores entre 10° e 40°. No segundo caso, pode-se dizer que as fraturas não apresentam direção favorável, existe apenas um sutil predomínio de direções entre 285° e 345° (NW), mas que não é significativo. O mergulho também apresenta dispersão, porém, pouco menor que no caso anterior, com ângulos distribuídos praticamente de forma igual entre 10° e 50°.

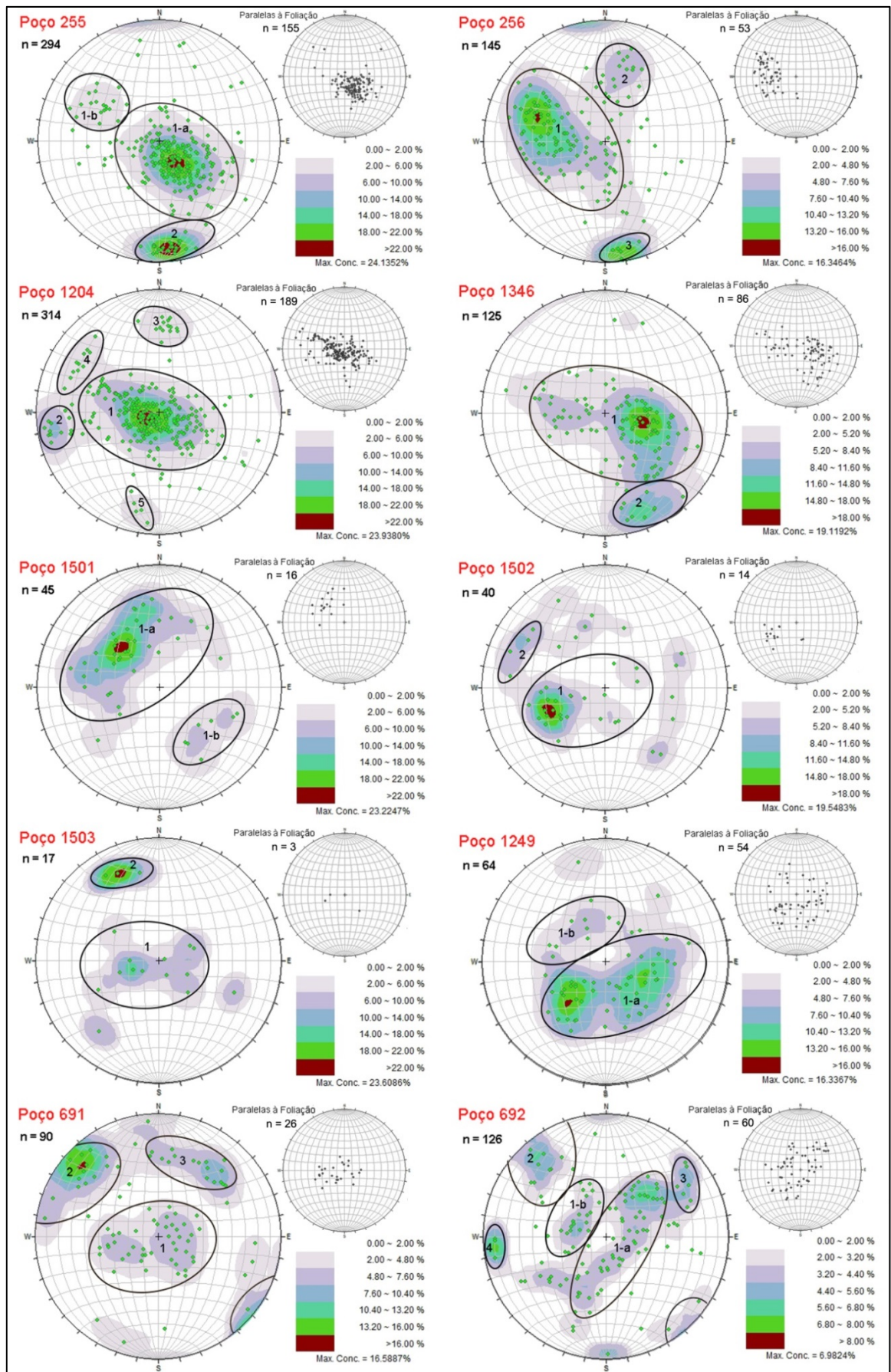


Figura 58 - Estereogramas de contorno de densidades, para cada poço, com a identificação de fraturas paralelas à foliação e dos principais grupos de fraturas

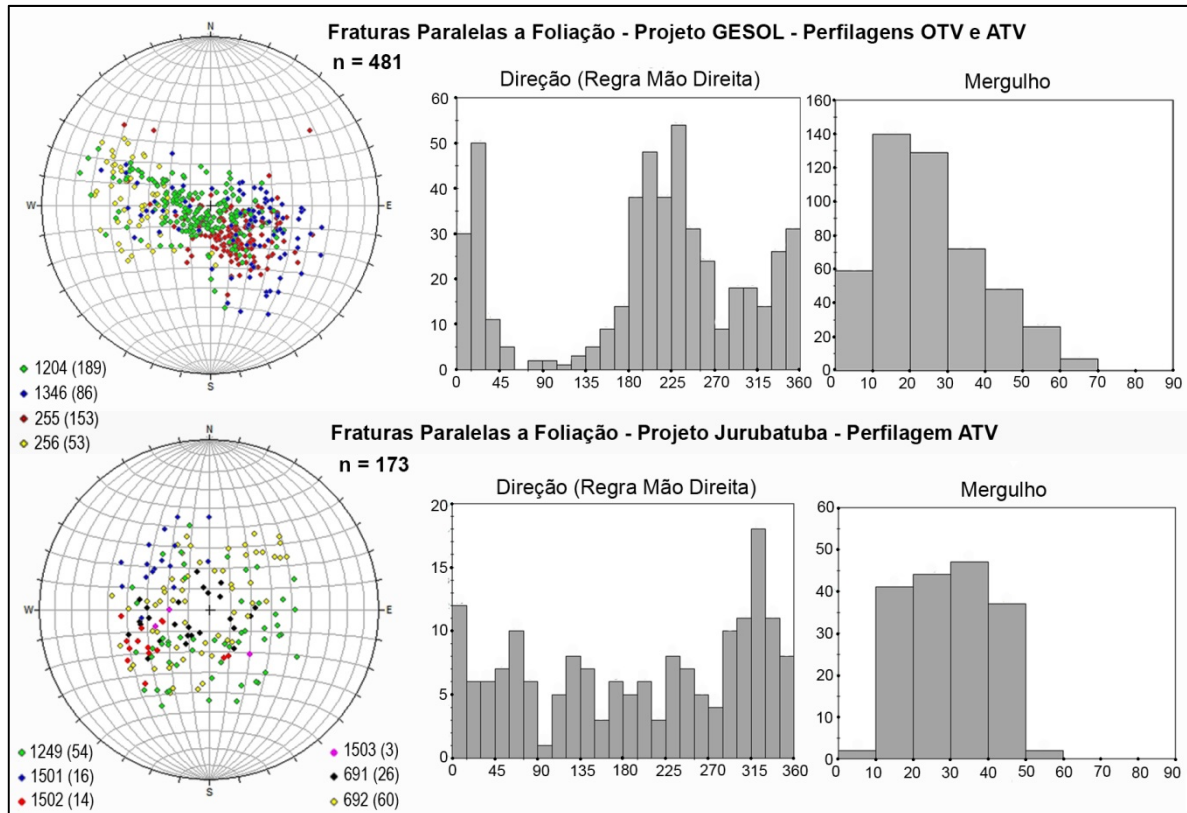


Figura 59 - Análise das fraturas paralelas à foliação, através de estereogramas (polo de fraturas) e histogramas de direção e mergulho, separados de acordo com o projeto vigente na sua coleta

Outros grupos de fraturas foram identificados. Entretanto, tais grupos ocorrem de forma muito mais restrita, de modo que eles não estão presentes em todos os poços e são poucos os que possuem mais de um desses grupos, destacando-se apenas os poços 1204 e 692 onde se observam as maiores quantidades de grupos de fraturas. Segue abaixo a descrição da ocorrência desses grupos, em ordem decrescente de importância.

- Grupo de direção E-W a ENE com mergulho superior a 60° : ocorre comumente nos poços 255 (grupo 2), 256 (grupo 3), 1204 (grupo 5), 1346 (grupo 2) com mergulho para norte e no poço 1503 (grupo 2), com mergulho para sul. Nos poços 255 e 256, a direção se dá entre N70-90E; nos poços 1346 e 1503, a direção está entre N60-80E e no poço 1204, a sua direção é WNW (N70-90W);

- Grupos de direção NE e mergulho superior a 60° ocorrem significativamente nos poços 691 e 692 (grupo 2, em ambos), com direção predominante entre N30-60E, estando também presente em menor proporção no poço 1204 (grupo 4) com direção similar, e no poço 1502 (grupo 2) com *trend* entre N10-40E;

- Grupo de direção E-W a WNW com mergulho médio, principalmente, entre 30° e 65°: presente essencialmente nos poços 256 (grupo 2) e 1204 (grupo 3) com os seguintes intervalos de direção, N60-90W e N75-90W, respectivamente;

- Grupo de direção N-S a NNW com mergulho superior a 60° ocorre, principalmente, no poço 1204 (grupo 2), com direção N0-15W, e com menor importância no poço 692 (grupo 4);

- Grupo de direção NW com mergulho entre 50° e 80° pode ser observado no poço 691 (grupo 3), onde há uma dispersão da direção entre N40-90W com um predomínio de fraturas N40-65W, e no poço 692 (grupo 3), onde a direção é N20-40W.

Uma outra análise dos principais grupos de fraturas presentes nos poços perfilados foi realizada através do *software* FracMan. Nesta análise, ao invés de se avaliar cada poço individualmente, os dados de fraturas foram separados conforme o projeto em que foram coletados e, também, considerando todos os poços em conjunto, independente do projeto (figura 60).

Através dos estereogramas de contorno de densidades, novamente, pode-se observar que o principal grupo, o qual sabemos que está relacionado com a foliação, está melhor definido nos dados fornecidos através dos poços do projeto Gesol. Com relação aos demais grupos, verifica-se que os grupos E-W a ENE com mergulho subvertical e E-W a WNW com mergulho médio são, indubitavelmente, identificados através dos dados do projeto Gesol (figura 60-a); enquanto os grupos de direção NE e N-S, ambos subverticais, são melhor identificados nos dados do projeto Jurubatuba (figura 60-b), onde também se observa a presença sutil do grupo NW. O estereograma de contorno onde todos os dados de fraturas foram agrupados (figura 60-c), possui forte semelhança com aquele obtido através dos dados do Gesol, mas isso é um reflexo da maior proporção (três vezes maior) desses dados em relação àqueles obtidos através do Jurubatuba. No estereograma em questão, além do grupo principal, verifica-se a presença bem definida de três grupos: (1) E-W a ENE com mergulho subvertical, (2) E-W a WNW com mergulho médio, e (3) N-S com mergulho subvertical; contudo, verifica-se uma dispersão irregular do grupo principal na direção NE, tornando difícil o estabelecimento de um limite entre o grupo paralelo à foliação e o grupo NE com mergulho médio maior que o da foliação.

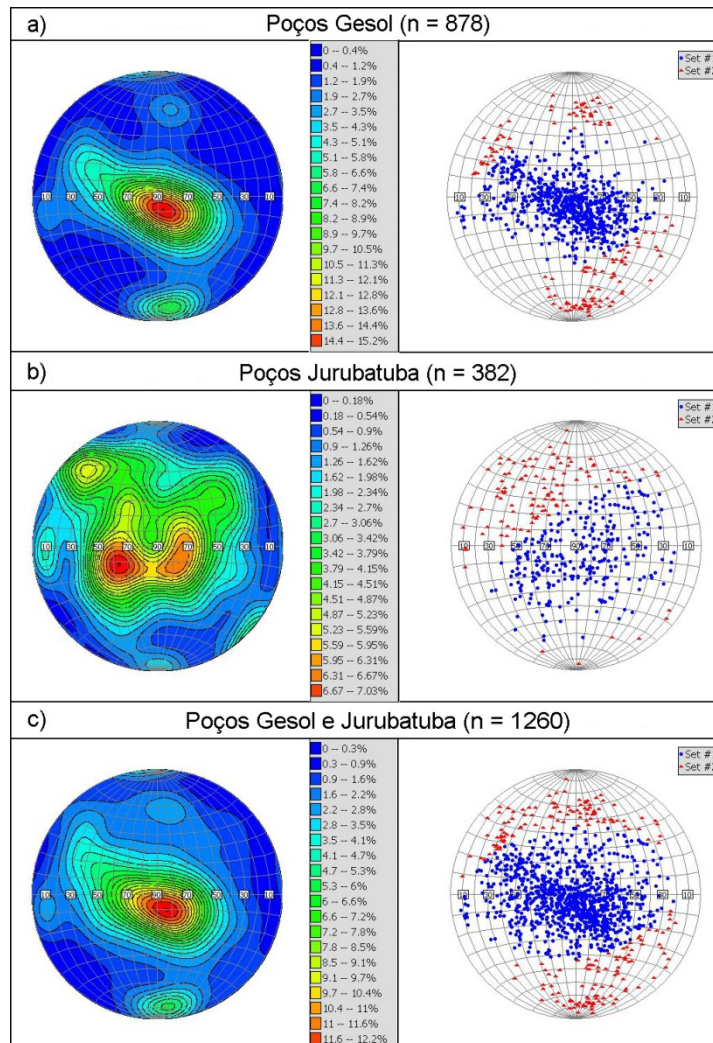


Figura 60 - Estereogramas de contorno de densidades e de polo de fraturas, com os grupos identificados pelo método ISIS (grupo 1 em azul e grupo 2 em vermelho) para as fraturas coletadas através do (a) projeto Gesol, (b) projeto Jurubatuba e (c) ambos os projetos

Ainda na figura 60, observa-se através dos estereogramas de polo de fraturas, que, diferente do que foi descrito acima, segundo a análise ISIS feita para os principais grupos de fraturas, nos três casos analisados ocorrem apenas dois grupos, excessivamente dispersos (grupo principal em azul e secundário em vermelho). No entanto, principalmente, para o grupo de fraturas de alto ângulo de mergulho, não é considerado adequado considerá-las como um único grupo, pois os dados dos afloramentos mostram que existem grupos de fraturas de alto ângulo bem definidos. Assim, neste caso, a análise ISIS apresenta importantes limitações que são derivadas do fato dos poços, sendo verticais, não seccionarem um número suficiente de fraturas subverticais de modo a definir grupos de fraturas distintos. Outro fator que dificulta a identificação de tais grupos é que a foliação das rochas está francamente dobrada, causando uma grande variação tanto nas sua direções

como mergulhos e, conseqüentemente, uma distribuição muito dispersa. Isto obscurece os limites entre grupos de fraturas associados à foliação e grupos de fraturas que não tem relação com a foliação.

Os valores de densidade e de espaçamento das fraturas de cada grupo encontrado por poço estão apresentados na tabela 12. Nesta tabela, utilizou-se, além da numeração, a direção predominante de cada grupo a fim de identificá-lo. Verifica-se que os dois métodos utilizados para a obtenção da densidade e do espaçamento não apresentaram resultados significativamente diferentes. De maneira geral, o espaçamento dos diferentes grupos variam de 0,7 a 12,7 m, pelo método de Terzaghi, e de 0,8 a 14,8 m, pelo método de Kiraly.

O principal grupo de fraturas de cada poço (grupo 1 ou subgrupo 1-a), relacionado à foliação, é sempre o grupo com maior densidade e menor espaçamento. Neste mesmo grupo, verifica-se que existe uma variação de tais parâmetros de um poço para o outro, sendo o espaçamento em torno de 1,0 m, nos poços 255, 256, 1204 e 1346; entre 1,5 e 2,5 m, nos poços 1501, 1249, 691 e 692; em torno de 3,5 e 7,0 m, nos poços 1502 e 1503, respectivamente. O subgrupo 1-b também é constituído por fraturas relacionadas com a foliação; porém, foi assim designado por apresentar direção e/ou mergulho médios mais dispersos em relação ao grupo principal. Seu espaçamento é maior do que o grupo 1-a, ocorrendo entre 6 e 6,5 m, nos poços 255, 1501 e 692, e em torno de 12 m, no poço 1249.

A ocorrência marcante do grupo em questão possibilitou a verificação do tipo de distribuição dos valores de densidade em um gráfico de frequência acumulada, concluindo-se que os dados se ajustam a uma distribuição logarítmica (figura 61; foram usados os dados obtidos pelo método de Terzaghi). Nos poços em que este grupo foi subdividido (1-a e 1-b), ambos os subgrupos foram utilizados para a realização dessa análise. Assim, também foram obtidos os valores de mediana e de quartis dos valores de densidade e espaçamento, apresentada na tabela 13. Nesta, segundo o método de Terzaghi, verifica-se para a densidade, valores de mediana e quartis (25 e 75%) em torno de 0,4, 0,15 e 0,8 fraturas por metro, respectivamente; e para o espaçamento, valores de mediana e quartis (25 e 75%) em torno de 2,2, 0,9 e 6,3 metros, respectivamente.

Tabela 12 - Valores de densidade e de espaçamento de cada grupo de fraturas obtidos, separadamente, para cada poço, através dos métodos de Terzaghi (1965) e de Kiraly (1970); estão destacados em vermelho os grupos cujo α é menor que 20°

Poço	N° Grupo	Dir Grupo	N° Frat	N° Frat $\alpha > 20^\circ$	α	Método Terzaghi (1965)				Método Kiraly (1970)			
						N90*10	N90	Dens	Espac	L	L*cos θ	Dens	Espac
255	1-a	Fol.	229	229	72	2595	260	1.31	0.8	198	189	1.21	0.8
255	1-b	Fol.	19	19	42	302	30	0.15	6.6	198	133	0.14	7.0
255	2	ENE	26	2	13	1280	128	0.65	1.5	198	45	0.58	1.7
256	1	Fol.	103	100	58	1460	146	0.94	1.1	156	132	0.78	1.3
256	2	WNW	19	19	44	298	30	0.19	5.2	156	108	0.18	5.7
256	3	ENE	5	0	10	379	38	0.24	4.1	156	27	0.18	5.4
1204	1	Fol.	257	257	84	2809	281	1.36	0.7	207	206	1.25	0.8
1204	2	N-S	13	5	18	541	54	0.26	3.8	207	64	0.20	4.9
1204	3	WNW	14	14	31	281	28	0.14	7.4	207	107	0.13	7.6
1204	4	NE	11	11	25	267	27	0.13	7.7	207	87	0.13	7.9
1204	5	ENE	5	2	21	163	16	0.08	12.7	207	74	0.07	14.8
1346	1	Fol.	114	113	75	1448	145	1.26	0.8	115	111	1.03	1.0
1346	2	ENE	9	3	17	377	38	0.33	3.0	115	34	0.27	3.7
1501	1-a	Fol.	36	36	55	508	51	0.72	1.4	70	57	0.63	1.6
1501	1-b	Fol.	7	7	44	107	11	0.15	6.6	70	49	0.14	7.0
1502	1	Fol.	24	24	65	296	30	0.29	3.4	102	92	0.26	3.9
1502	2	NE	4	3	25	99	10	0.10	10.3	102	43	0.09	10.8
1503	1	Fol.	12	12	84	133	13	0.15	6.8	90	89	0.13	7.5
1503	2	ENE	3	2	24	76	8	0.08	11.8	90	37	0.08	12.2
1249	1-a	Fol.	49	49	68	619	62	0.43	2.3	143	133	0.37	2.7
1249	1-b	Fol.	10	10	63	119	12	0.08	12.0	143	128	0.08	12.8
691	1	Fol.	46	46	85	503	50	0.62	1.6	82	81	0.57	1.8
691	2	NE	15	8	19	625	63	0.77	1.3	82	27	0.56	1.8
691	3	NW	18	17	34	341	34	0.42	2.4	82	46	0.39	2.5
692	1-a	Fol.	58	58	79	696	70	0.46	2.2	152	149	0.39	2.6
692	1-b	Fol.	23	23	68	258	26	0.17	5.9	152	141	0.16	6.1
692	2	NE	13	9	22	420	42	0.28	3.6	152	57	0.23	4.4
692	3	NW	7	5	24	194	19	0.13	7.8	152	62	0.11	8.8
692	4	N-S	3	0	10	166	17	0.11	9.1	152	26	0.11	8.8

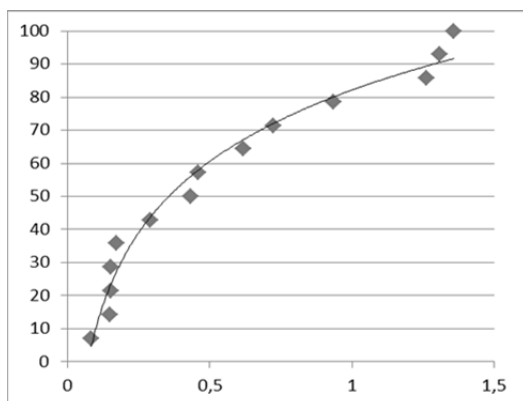


Figura 61 - Gráfico de frequência acumulada (%) mostra distribuição logarítmica para a densidade (abscissas)

Tabela 13 - Mediana e quartis da densidade e do espaçamento do principal grupo de fraturas identificado através dos dados de perfilagens de poços

Densidade		Espaçamento	
Terzaghi	Kiraly	Terzaghi	Kiraly
Mediana	Mediana	Mediana	Mediana
25% e 75%	25% e 75%	25% e 75%	25% e 75%
0,43	0,37	2,18	2,57
0,15 e 0,84	0,14 e 0,70	0,9 e 6,3	1,1 e 6,5

Nos outros grupos de fraturas, há uma maior dificuldade na análise da densidade e espaçamento, devido a duas causas principais: (1) ocorrência restrita desses grupos a poucos poços, o que não permite uma boa análise estatística; e (2) alguns desses grupos possuem o ângulo α , entre a atitude média do grupo de fraturas e o poço, igual ou inferior a 20° , o que prejudica muito a precisão dos resultados dos parâmetros desejados.

O grupo ENE, com maior ocorrência nos diferentes poços, possui α menor que 20° em três dos cinco poços em que está presente (255, 256 e 1346). Neles, o espaçamento varia em torno de 1,5 a 4 m; nos poços 1204 e 1503, ocorre em torno de 13 e 12 m, respectivamente. O grupo NE, segundo com maior ocorrência, apresenta valores de espaçamento que variam de 3,5 a 10,5 m, desconsiderando o espaçamento em torno de 1,5 m obtido para o poço 691, cujo α é igual a 19° . O grupo WNW, com mergulho essencialmente médio, apresentou espaçamento em torno de 5,5 e 7,5 m, respectivamente, nos poços 256 e 1204. O grupo N-S possui polo médio fazendo ângulo inferior a 20° nos dois poços onde foi identificado (1204 e 692); neles, o espaçamento se deu em torno de 4 e 9 m. O grupo NW, no poço 692, apresentou um espaçamento de aproximadamente 8 m e, no poço 691, onde esse grupo apresenta uma forte dispersão, de modo que ocorrem fraturas correlacionáveis ao grupo WNW, o espaçamento foi de aproximadamente 2,5 m.

4.4.3 Análise de Fluxo

Para discutir os resultados obtidos através do *flowmeter* com relação às principais profundidades de entrada ou saída de água e, conseqüentemente, das fraturas mais importantes para o fluxo, novamente, serão utilizadas as figuras 53, 54, 55 e 56, que contém o perfil de vazão e os *tadpoles* classificados de acordo com a intensidade relativa de vazão de cada fratura (sem vazão significativa, vazão baixa, vazão moderada, vazão alta e vazão muito alta).

No primeiro perfil, referente ao poço 255 (figura 53), verifica-se uma importante entrada de água próximo ao final do poço, a 220 m de profundidade, onde foram identificadas as fraturas com maior vazão (vazão alta). No intervalo entre 140 e 195 m, nota-se uma ocorrência alternada de entradas e saídas de água. Este intervalo contém uma expressiva zona de fraturamento, onde há uma grande quantidade de fraturas classificadas como muito espessas (figura 62-a). Entretanto, a maior parte dessas fraturas contribuíram com uma pequena variação da vazão, havendo um destaque nas fraturas a ~150 m, onde esta variação foi um pouco maior (vazão moderada). Em seguida, identifica-se mais um local de entrada de água, entre 115 e 119 m (vazão moderada), e outro de saída, em torno de 100 m (vazão baixa). Após esta profundidade, destaca-se uma significativa saída de água nas proximidades do tubo de revestimento, entre 25 e 30 m de profundidade (vazão muito alta). Não é possível determinar se essa saída ocorre no interior do tubo ou em sua extremidade.

O poço 256 (figura 54) foi o que apresentou a maior quantidade de fraturas com maiores valores de vazão, sendo este o que apresenta maior capacidade específica (0,41 m³/h/m). Entradas de água ocorrem logo na extremidade do poço, em torno de 220 m (vazão moderada). Em seguida, verifica-se uma saída de água a entre 208 e 211 m (vazão baixa), que coincide com a presença um fraturamento de espessura proeminente, e uma entrada de água entre 178,5 e 181,0 m (vazão baixa). No intervalo entre 120 e 150 m é que se constituem as principais fraturas favoráveis ao fluxo (maioria com vazão moderada), destacando-se as fraturas presentes entre 145 e 155 m (vazão muito alta; figura 62-b). Em torno de 100 m de profundidade ocorre outra fratura importante para o fluxo (vazão alta), e entre 80 e 91 m estão presentes fraturas com menor importância (vazão baixa). Considera-se

ainda que, possivelmente, ocorrem saídas de água através do revestimento (vazão baixa).

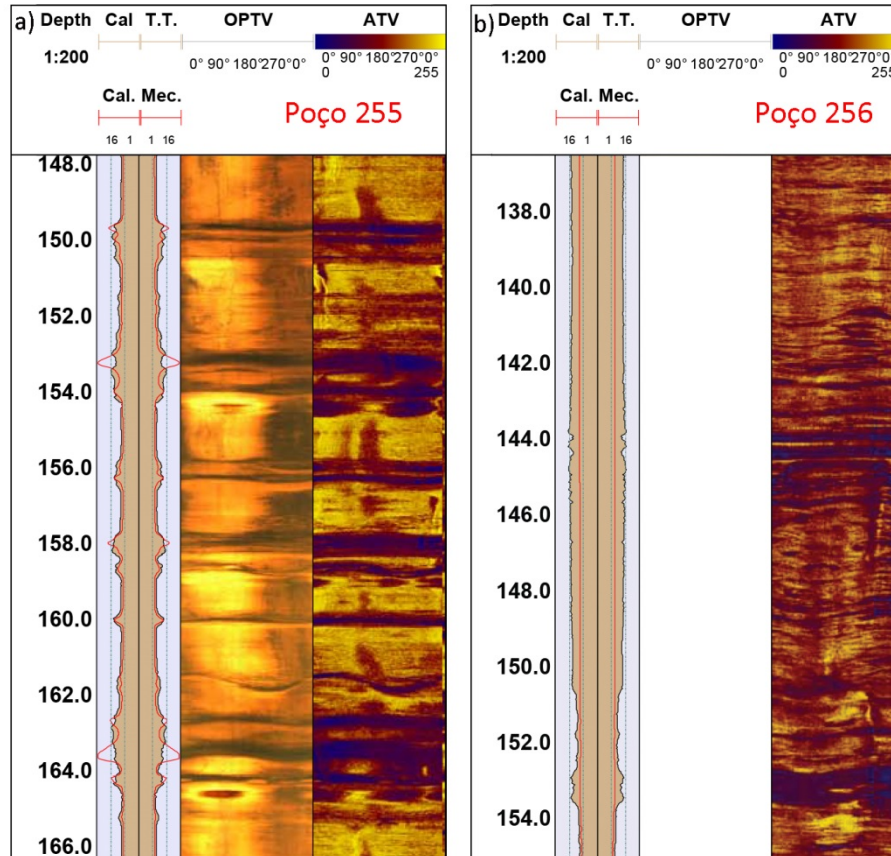


Figura 62 - Trechos de perfilagens em que ocorrem fraturas importantes para o fluxo (a) perfilagens cáliber, OTV e ATV para o intervalo entre 148,0 e 166,0 m do poço 255; (b) perfilagens cáliber e ATV (não foi feito OTV neste trecho) para o intervalo entre 136,5 e 155,0 m do poço 256

No poço 1204 (figura 55), a primeira entrada de água se deu em torno de 251 m (vazão baixa), onde também se verifica um fraturamento muito espesso (figura 63-a). Nas profundidades em torno de 241, 220 e 204 m ocorrem fraturas por onde houve saídas de água (maioria de vazão baixa), estando em destaque a fratura a ~204 m (figura 63-a), através da qual toda a água presente no poço se extraviou (vazão muito alta). Sendo assim, configura-se um intervalo em que não há fluxo no interior do poço até a profundidade de ~127 m, onde existe mais um fraturamento proeminente, através do qual ocorre uma nova entrada de água (vazão baixa). Em seguida, destaca-se apenas mais uma profundidade em que há entrada de água a aproximadamente 120 m (vazão baixa). Após esta profundidade, há apenas uma variação do fluxo em torno de 7 m, já no revestimento (vazão baixa).

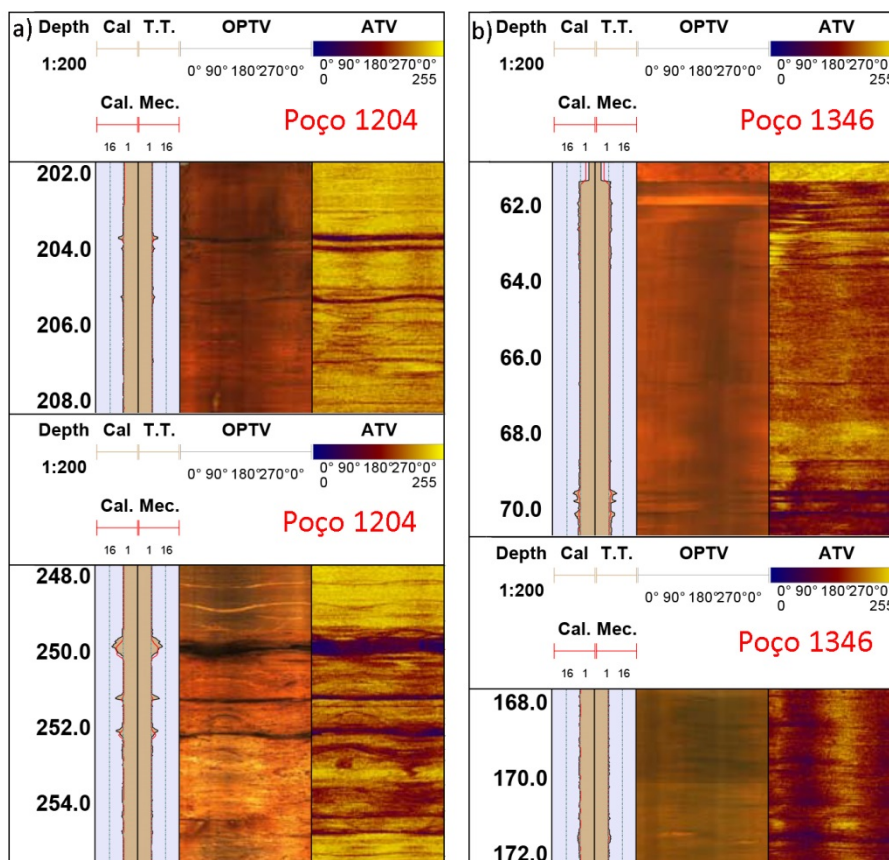


Figura 63 - Trechos de perfilagens em que ocorrem fraturas importantes para o fluxo (a) perfilagens cáliper, OTV e ATV para os intervalos entre 202,0 e 208,0 m e 248,0 e 255,8 m do poço 1204; (b) perfilagens cáliper, OTV e ATV para os intervalos entre 61,0 e 70,5 m e 168,0 e 172,0 do poço 1346

No poço 1346 (figura 56), novamente, se observam entradas de água logo no final do poço, a partir de fraturas em torno de 168 até 174,5 m (vazão baixa; figura 63-b). Em seguida, ocorre uma saída de água através de fraturas entre 133 e 135 m (vazão baixa) e entradas de água em torno de 93,5 e 82 m (vazão baixa). Verifica-se que, as duas últimas profundidades, coincidem com a presença de fraturas classificadas como espessas. Uma importante saída de água é observada através de fraturas entre 62 e 69 m (figura 63-b), as quais constituem as fraturas com maior vazão neste poço (vazão moderada). Possivelmente, ocorrem saídas de água através do revestimento, assim como visto nos demais poços.

Ainda com relação aos resultados obtidos através dos perfis de *tadpoles*, observa-se que a maior parte das fraturas classificadas como pouco espessas e espessas não apresentaram vazão significativa. Algumas fraturas classificadas como muito espessas podem apresentar certa vazão, principalmente, nos poços 255 e 256; contudo, o que se observa nos diferentes poços é que, frequentemente, as

fraturas com os maiores valores de vazão não coincidem com as fraturas de maior espessura aparente, havendo uma única exceção no poço 256. Como as perfilagens com o *flowmeter* foram realizadas apenas em condições naturais (sem bombeamento), considera-se que algumas fraturas que não apresentaram vazão significativa poderiam permitir uma maior passagem de fluxo quando submetidas a bombeamento ou a ensaios com transdutores, principalmente aquelas classificadas com certa espessura aparente. Da mesma forma, as fraturas identificadas com algum fluxo poderiam apresentar uma vazão maior do que a observada.

Com a finalidade de avaliar se existe relação entre as fraturas mais importantes para o fluxo e os grupos de fraturas descritos anteriormente, plotou-se os polos de fraturas, em estereogramas, classificados de acordo com a sua provável intensidade de vazão, determinada através dos resultados do *flowmeter* (figura 64).

Primeiramente, o que se destaca na figura 64, é a pequena proporção de fraturas que apresentou alguma vazão significativa (baixa, moderada, alta ou muito alta). No estereograma com dados de todos os poços, essas fraturas correspondem a 19%, sendo que destes, 62% são fraturas com baixa vazão. Esta porcentagem varia quando se analisam os dados, individualmente, para cada poço, de modo que o poço 1204 apresentou a menor proporção destas fraturas (6%) e o poço 256 apresentou a maior proporção de fraturas com alguma vazão (35%). Estes possuem maior vazão específica (0,15 e 0,41 m³/h/m, respectivamente) em relação aos poços 255, com 21% de suas fraturas com alguma vazão, e 1346, com 27% (0,06 e 0,07 m³/h/m, respectivamente). Interessantemente, os poços 256 e 1204 são os únicos que apresentaram fraturas com vazão muito alta (10 e 3 fraturas, respectivamente). Por outro lado, o poço 255 explora quatro fraturas com alta vazão, o que, a princípio, é incoerente com o fato do poço 1346 não apresentar nenhuma fratura com alta vazão e possuir vazão específica semelhante.

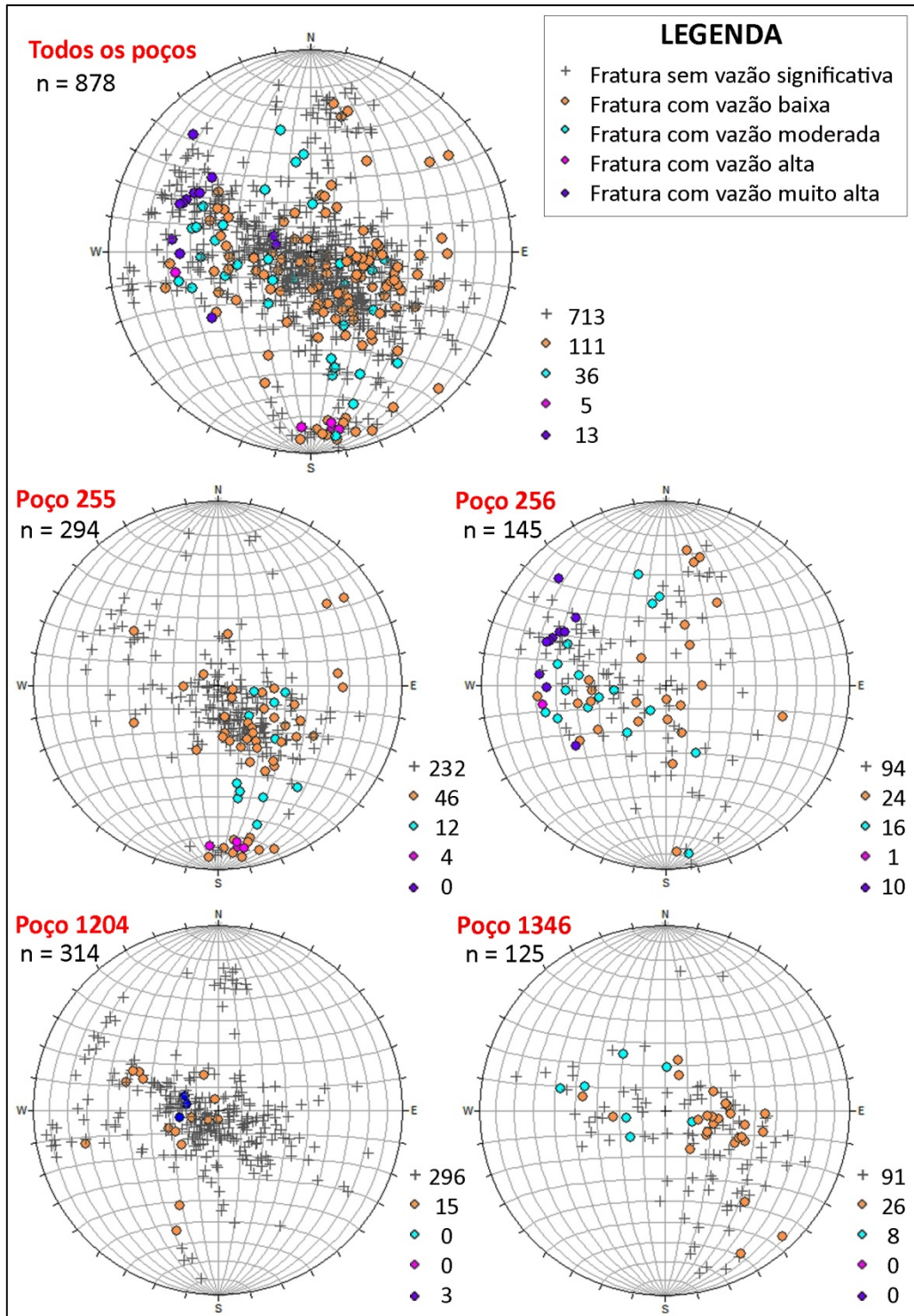


Figura 64 - Estereogramas com polos de fraturas classificados de acordo com a intensidade de vazão (todos os dados juntos e também separados por poço)

Quanto aos grupos de fraturas, verifica-se que a maioria das fraturas onde foi identificada alguma vazão corresponde ao principal grupo de fraturas, ou seja, ao grupo de fraturas paralelas à foliação. Contudo, na maior parte das fraturas deste grupo, observou-se uma vazão com intensidade baixa a moderada. Os grupos de

fraturas onde foram identificadas vazões altas são: (1) de direção E-W e subverticais (4 fraturas no poço 255) e (2) de direção N-S e mergulho um pouco menor que 60° (1 fratura no poço 256). Estas foram as únicas fraturas de todos os poços com esta característica. Os grupos de vazão muito alta são: (1) de direção NNE (6 fraturas no poço 256), (2) N-S (2 fraturas no poço 256) e ainda (3) NW (1 fratura no poço 256), todas com mergulho entre 50° e 60°, respectivamente, para ESE, E ou NE. Ainda com vazão muito alta foram identificadas fraturas de baixo ângulo de mergulho (cerca de 15°) e direção N-S a NE (3 fraturas no poço 1204) paralela à foliação.

Por último, é importante ainda observar o resultado das fraturas em que foram identificadas coloração alaranjada de alteração ou rocha alterada, que são indicativos de fluxo, e daquelas que, possivelmente, se apresentavam preenchidas. Quanto a esta característica, foram consideradas preenchidas apenas as fraturas de direção E-W, no poço 1204, onde foi observada através da perfilagem OTV uma coloração preta no seu traço e cujos cálipers acústico e mecânico não indicaram variação de espessura. Concordantemente, neste poço, as fraturas E-W não apresentaram vazão significativa.

Quanto aos indicativos de fluxo, cor alaranjada e rocha alterada, o poço 1204 foi o que apresentou a maior quantidade de fraturas com essa característica (22%), sendo a maior parte delas do grupo principal, paralelo à foliação (86%), seguido pelo grupo de direção N-S, subvertical (7%). A maior parte das fraturas que apresentaram rocha alterada correspondem às fraturas de zonas espessas e muito espessas, havendo uma pequena quantidade em fraturas pouco espessas. Entretanto, mesmo com estes indicativos de fluxo, apenas 15% das fraturas com cor de alteração apresentaram vazão baixa e uma única fratura com rocha alterada apresentou vazão muito alta, o restante apresentou vazão insignificante. Nos demais poços, não foram observadas fraturas com cor de alteração e apenas algumas unidades apresentaram rocha alterada. Assim como no poço 1204, as fraturas com alteração de rocha associada possuem maior espessura, mas a maior parte não apresenta vazão significativa; no poço 255, apenas uma pequena zona de fraturas muito espessas (com rocha alterada) apresentou baixa vazão e, no poço 1346, uma única fratura pouco espessa (com rocha alterada) apresentou baixa vazão.

4.5 Comparação dos Resultados e Elaboração do Modelo Conceitual

O modelo conceitual do Aquífero Cristalino na área de estudo foi elaborado com base numa síntese dos dados estruturais. Esta síntese engloba as seguintes análises (apresentadas mais abaixo):

- Comparação das direções de lineamentos com as dos grupos de fraturas obtidos nos afloramentos e nos poços;
- Comparação das atitudes e espaçamentos dos grupos de fraturas identificados nos afloramentos e nos poços;
- Comparação das feições indicativas de fluxo de um afloramento para o outro e destes com relação aos resultados do *flowmeter*;
- Comparação dos grupos de fraturas mais transmissivos com os dados de neotectônica e de esforços atuais.

Os resultados obtidos através da análise de lineamentos podem ser comparados com os grupos de fraturas identificados nos afloramentos e nos poços. Porém, sendo os lineamentos expressão superficial de estruturas de alto ângulo de mergulho, somente podem ser comparados com os grupos de fraturas subverticais.

Os lineamentos de escala regional apresentam quatro direções principais: NW (N30-50W), N-S (N10W-N10E), NE (N20-40E) e E-W a ENE (N60-90E). Dentre elas, há um ligeiro predomínio das direções NW e ENE; as com maior continuidade (comprimento) são: E-W (predomínio de N80-90W), NE (N40-60E) e N-S (N10E), respectivamente. Nos lineamentos de escala local, traçados apenas para a área de ocorrência dos poços, destacam-se apenas duas direções: N-S (predomínio para N0-10W) e E-W, respectivamente.

Com relação aos grupos de fraturas subverticais observados nos afloramentos, o de direção NW a NNW foi o único comum a todos os afloramentos, ocorrendo com maior importância na pedreira GS-1 (N10-60W) e GS-3 (N10-40W). Outros dois grupos principais foram observados: o de direção E-W a ENE, nas pedreiras GS-3 e GS-4 (N60-90E), e mais restritamente, o de direção NE, nas pedreiras GS-3 (N20-50E) e GS-4 (N40-60E). Sendo assim, das quatro direções presentes nos lineamentos, três foram encontradas nos grupos subverticais dos afloramentos e, apesar da N-S não ocorrer de forma bem definida, têm-se uma quantidade significativa de fraturas NNW (N10W), nas pedreiras GS-1 e GS-3. Portanto, considera-se que existe uma correlação positiva entre as direções

observadas nos lineamentos de escala regional e as direções do grupos de fraturas subverticais nos afloramentos; nota-se, também, que as duas direções ligeiramente mais frequentes nos lineamentos, NW e ENE, são os grupos subverticais mais marcantes nos afloramentos.

Quanto aos grupos de maior mergulho (superior a 60°) identificados através das perfilagens, predomina o grupo de direção E-W a ENE, o qual foi observado nos poços 255, 256 (ambos N70-90E), 1204 (N70-90W), 1346 e 1503 (ambos N60-80E); secundariamente, ocorre o grupo de direção NE, identificado nos poços 691, 692, 1204 (N30-60E) e 1502 (N10-40E); e em seguida, verificou-se o grupo de direção N-S a NNW nos poços 1204 e 692 (N0-15W). Com ângulo de mergulho um pouco menor, entre 50° e 80°, ocorre, em menor proporção, o grupo de direção NW, nos poços 691 (N40-65W) e 692 (N10-40W). Deste modo, verifica-se que apesar dos grupos com mergulhos elevados serem subamostrados nos poços verticais, considera-se que os quatro *trends* observados nos lineamentos de escala regional foram identificados através das perfilagens. Entretanto, a direção NW proeminente em tais lineamentos, não ocorreu de forma relevante nos dados de poços. Com relação aos lineamentos de escala local, diferente do que foi observado nestes, nos dados de poços, a direção E-W ocorreu de forma mais importante do que a NNW, seguida pela direção NE, a qual nem foi encontrada de forma significativa nos lineamentos.

Uma comparação entre os grupos de fraturas observados nos afloramentos e aqueles presentes nos poços também se faz bastante importante, principalmente, para (1) verificar se os grupos de fraturas identificados em locais diferentes e através de métodos distintos são correlacionáveis e, em caso afirmativo, para (2) melhor caracterizar os grupos com mergulhos subverticais subamostrados nas perfilagens.

A comparação entre os lineamentos e os grupos de fraturas subverticais, de afloramentos e de poços, revelou que os grupos de direção E-W a ENE e NE são importantes em ambos. Por outro lado, as fraturas mais frequentes nos afloramentos, com direção NW, são muito subordinadas nos poços. Nestes, a direção N-S a NNW, bem definida, pode ser correlacionável à NNW dos afloramentos, as quais, provavelmente, são conjugadas do grupo NW.

Com relação aos grupos com ângulo de mergulho médio ou baixo, observam-se os seguintes grupos em comum para poços e afloramentos: (1) direção E-W a WNW (nos poços e na GS-3) ou a ENE (GS-4) e mergulho entre 30° e 65°; (2) grupo

de baixo ângulo de mergulho (<30°), de direção dispersa tendendo para NNE, que nos poços está muitas vezes associado à foliação, enquanto na GS-1 (único afloramento em que está presente), esta associação não ocorre. Nos poços, este grupo de baixo ângulo, insere-se naquele em que predominam as direções NNE e NE e mergulhos entre 10° e 40°, presente de forma marcante. Nos afloramentos, ocorrem três grupos não identificados nos poços: grupos de direção N-S e ângulo de mergulho médio, entre 30° e 60° para leste e entre 45° e 75° para oeste, na GS-2; e grupo de direção E-W e mergulho entre 30° e 40°, na GS-4.

Uma síntese dos espaçamentos de fraturas para os grupos comuns aos afloramentos e aos poços é apresentada na tabela 14. Nela, observa-se que os espaçamentos obtidos nos poços, de maneira geral, ocorrem dentro da ordem de grandeza daqueles obtidos nos afloramentos, sendo métrica a decamétrica, com exceção do grupo NE vertical, que apresenta espaçamento principalmente decamétrico, nos afloramentos, e métrico, nos poços. Considera-se que os espaçamentos dos grupos subverticais obtidos nos afloramentos são mais representativos do que aqueles obtidos através das perfilagens, principalmente, devido à maior quantidade de dados analisados. Os dados coletados nos afloramentos mostram claramente o caráter bimodal dos espaçamentos dos grupos NW e E-W, subvertical, e E-W de ângulo médio, devido à presença de zonas de fraturas, com espaçamento centimétrico a decimétrico.

Tabela 14 - Valores de espaçamento de fraturas (em metros) para os grupos comuns aos afloramentos e aos poços (* pedra em que o grupo aparece de forma mais marcante)

Grupo (direção e ângulo de mergulho)	Afloramento			Poço	
	ID	Espac. Frat. Simples (m)	Espac. Zona de Fratura (m)	ID	Espac. (m)
NW vertical	GS-1*	3,5 - 14,0	0,05 - 0,55	691	2,5
	GS-3*	5,0 - 14,0	0,10 - 0,50	692	8,0
	GS-4	2,5 - 6,5	-	-	-
E-W vertical	GS-3	2,5 - 12,5	0,50	1503	12,0
	GS-4*	2,5 - 8,5	0,20 - 0,80	1204	13,0
NE vertical	GS-1	15,0 a 32,0	-	692	3,5
			-	1204	7,5
	GS-2	28,0	-	1502	10,5
E-W médio	GS-1	9,0 - 34,5	-	256	5,5
	GS-3*	1,5 - 17,0	0,20	1204	7,5
	GS-4	3,5 - 37,0	-	-	-
NNE (GS-1) e NNE a NE (poços) baixo	GS-1	0,9 - 5	-	Todos	1,0 - 6,5

Outras comparações importantes devem ser feitas com relação a (1) ocorrência de feições indicativas de fluxo em cada um dos grupos de fraturas, de acordo com o afloramento onde ocorrem, e (2) entre tais grupos com feições de fluxo e os dados do *flowmeter* para os grupos presentes nos poços.

Através da síntese dos principais grupos de fraturas identificados nos afloramentos e de suas características, apresentadas na tabela 9, pode-se ordenar os grupos, em ordem crescente de significância para o fluxo de água subterrânea, da seguinte maneira:

- Grupos N-S de ângulo médio (GS-2) e E-W de ângulo baixo (GS-4), que não apresentaram feições de fluxo;

- Grupo E-W de ângulo médio, que ocorreu sem feições de fluxo (GS-3), ou com alterações de cor ocre pontual (GS-2) ou incipiente (GS-4);

- Grupo NE de ângulo alto, que ocorreu sem feições de fluxo (GS-2), ou raramente com alterações de cor ocre (GS-1), ou com alteração intensa, inclusive em maiores profundidades (locais específicos da pedreira GS-3);

- Grupos E-W e NW a NNW de ângulo alto, os quais apresentaram feições de alteração em todos os afloramentos em que foram identificados. O grupo NW a NNW apresentou alteração de cor ocre (GS-1, GS-2, GS-3 e GS-4) e vegetação (GS-1 e GS-3), e o grupo E-W apresentou cor ocre (GS-3 e GS-4) e, também, halos de alteração, rocha alterada e vegetação (GS-4). No caso destas últimas observações, realizadas no GS-4, é importante lembrar que foram realizadas em paredes muito mais próximas à superfície (pedreira rasa), prejudicando a comparação com as demais pedreiras, onde foram observadas paredes mais profundas.

- Grupo subhorizontal com direção tendendo para NNE (GS-1), que apesar de ser exclusivo de um único afloramento, apresentou a maior quantidade de fraturas com feições de fluxo, como significativa alteração ocre desde próximo à superfície até no mínimo 70 m de profundidade, além de vegetação e escoamento de água até cerca de 35 m de profundidade.

A partir dos resultados obtidos com o *flowmeter*, por sua vez, os grupos de fraturas podem ser classificados, em ordem crescente de importância para o fluxo, da seguinte maneira:

- Grupos N-S (ou NNW) e NE, de mergulho alto, ambos presentes apenas no poço 1204, cujas fraturas não apresentaram vazão significativa;

- Grupo E-W de ângulo médio, observado nos poços 1204 e 256, cujas fraturas não apresentaram vazão significativa no primeiro, mas algumas apresentaram vazão baixa e moderada no último;

- Grupo E-W de ângulo alto, tais fraturas ocorreram em todos os poços perfilados, havendo algumas representantes no poço 256 com vazão baixa e moderada, e maior destaque no poço 255, onde todas as fraturas apresentaram vazão, alta ou baixa;

- Grupo de fraturas relacionadas à foliação, com mergulho subhorizontal a médio (até 60°) e direção entre NNE e NE, que apresentaram algumas fraturas de vazão muito alta, no poço 1204 (com direção N-S a NE e mergulho em torno de 15°) e no poço 256 (com direção predominante entre N-S e N45E e ângulo de mergulho entre 50° e 60°), além de uma ampla quantidade de fraturas com vazão baixa e moderada, em todos os poços.

Desta forma, verifica-se que, o grupo de fraturas com maior significado para o fluxo identificados através dos resultados dos afloramentos e dos poços, corresponde ao grupo com direção predominante NNE a NE e mergulho subhorizontal a médio. Com relação aos demais grupos, apenas dois apresentaram resultados semelhantes, que foram: o grupo E-W ângulo médio, cujas fraturas apresentaram pouco significado para o fluxo nos poços em que ocorreram e evidências de alteração praticamente ausentes nos afloramentos, e o grupo E-W subvertical, cujas fraturas de vazão elevada, no poço 255, estão de acordo com a presença de evidência de alteração (principalmente, superfície ocre) nos afloramentos.

Os grupo NW a NNW e NE, de mergulho alto, por sua vez, que apresentaram certa importância para o fluxo nos afloramentos, não foi relevante nos poços. Pelas feições de alteração observadas em campo, as fraturas NW, que ocorrem com grande frequência nos afloramentos, deveriam ser semelhantes às E-W; no entanto, as fraturas NNW do poço 1204, associadas a este grupo, não apresentaram fluxo e fraturas NW de alto ângulo são raras nos poços. O mesmo ocorre com as fraturas NE de alto ângulo de mergulho, cujas alterações observadas na GS-3 indicam uma circulação de água mais intensa em determinadas fraturas desta direção; porém, não houve evidências de fluxo nas fraturas do mesmo grupo presentes no poço 1204. Porém, é importante lembrar que: (1) a ausência de fluxo (ou fluxo não

significativo) observada nos poços para as fraturas de alto ângulo, não pode ser considerada conclusiva, pois os poços seccionam poucas fraturas deste tipo, e (2) a ausência de fluxo indicada através do *flowmeter*, não descarta a possibilidade de tais fraturas serem abertas, pois a perfilagem foi realizada apenas em condições ambiente, sendo necessário, na continuação do Projeto Gesol, realizá-la também em condições de bombeamento.

Sendo assim, através dos dados disponíveis, as evidências de fluxo observadas nos afloramentos e nos poços indicam que os grupos NW a NNW, E-W e NE, de mergulho alto, podem apresentar alguma importância para o fluxo, porém, elas não apontam claramente a hierarquia entre os grupos.

Uma última comparação pode ser feita com relação aos eventos tectônicos atuais, sugeridos pelos diversos autores (item 2.4.2), e os resultados apresentados acima. Na tabela 1, são indicados para o campo de esforços quaternário mais recente, σ_1 orientado segundo NNE em regime transcorrente, na região de Campinas (Fernandes & Amaral, 2002), ou σ_1 na direção E-W em regime compressivo na Bacia de Taubaté (Salvador & Riccomini, 1995). De acordo com os dados de mecanismos focais, que determinam mais seguramente o campo de esforços atuais, a cidade de São Paulo encontra-se entre duas áreas que tem indicação de SHmax de direção NE, em regime compressivo ou transcorrente.

Conforme os estudos que relacionam a orientação das fraturas mais transmissivas com os campos de esforços atuais (item 2.2), as fraturas com fluxo são as que estão com atitude perpendicular ao esforço mínimo principal atual (σ_3), ou fazendo um ângulo de até 30° com o esforço máximo principal (σ_1) - ou seja, com orientação ideal para o cisalhamento. Sendo assim, de acordo com os campos de esforços atuais propostos, as fraturas mais favoráveis ao fluxo são as de baixo ângulo, segundo regime compressivo, ou falhas de alto ângulo, provavelmente, de direções NE ou E-W, segundo regime transcorrente.

Interessantemente, neste trabalho, os resultados das fraturas provavelmente mais favoráveis ao fluxo estão de acordo com um regime de esforços atual compressivo, pois tais fraturas correspondem ao grupo com direção tendendo para NNE a NE, nos afloramentos e poços, frequentemente associado à foliação. No poço 1204, as fraturas com as vazões mais elevadas são as N-S a NNE de mergulho inferior a 15°, sendo compatível com o regime compressivo, e no poço

256, as vazões mais elevadas associam-se às fraturas N-S a NE com mergulho entre 50° e 60°, que podem ser reativadas por diversos campos de esforços.

De acordo com as principais características dos grupos de fraturas discutidas acima, elaborou-se o modelo conceitual de circulação de água subterrânea, onde é representada a rede de fraturas e a importância relativa dos grupos de fraturas em relação ao fluxo (figura 65). Neste modelo, para cada grupo de fratura com ângulo de mergulho médio e alto, foi representado o menor e o maior espaçamento (*ending members*) considerando todos os afloramentos onde estes grupos ocorreram. No caso do grupo de ângulo baixo, utilizaram-se os espaçamentos mínimo e máximo obtidos para o grupo associado à foliação, presentes nos poços. Desta forma, considera-se que as fraturas podem ocorrer com qualquer espaçamento entre aqueles, mínimo e máximo, apresentados. As zonas de fraturas, de espessura centimétrica a decimétrica, típicas dos grupos NW e E-W com mergulho elevado, não foram representadas, devido à escala utilizada no modelo. Observam-se, então, na figura 65, os seguintes grupos de fraturas e suas respectivas características:

- Direção NNE a NE, com baixo ângulo de mergulho (chegando também a valores médios), associada à foliação, com espaçamentos mínimo e máximo iguais a 1 e 6,5 m, respectivamente, sendo considerado como o grupo de fraturas de maior ocorrência, maior continuidade e maior importância para a circulação da água subterrânea;

- Direção E-W a ENE, com alto ângulo de mergulho, espaçamentos mínimo e máximo iguais a 2,5 e 12,5 m, respectivamente, apresentando fraturas decamétricas, com terminações apenas nas fraturas associadas à foliação, com alguma importância para a circulação da água subterrânea, sendo provavelmente o grupo de maior ocorrência entre os subverticais;

- Direção NW a NNW, com alto ângulo de mergulho, espaçamentos mínimo e máximo iguais a 2,5 e 14 m, respectivamente, apresentando fraturas de grande continuidade (seccionam de forma contínua várias bancadas da GS-3), sendo pelo menos decamétricas, com terminações nas fraturas de baixo ângulo e nas E-W a ENE subverticais, com alguma importância para a circulação da água subterrânea, sendo provavelmente o grupo com segunda maior ocorrência entre os subverticais;

- Direção NE, com alto ângulo de mergulho, espaçamentos mínimo e máximo iguais a 15 e 32 m, respectivamente, apresentando fraturas decamétricas, com

terminações nas fraturas de baixo ângulo e, possivelmente, nas E-W a ENE subverticais, com alguma importância para a circulação da água subterrânea, sendo o grupo de menor ocorrência entre os subverticais;

- Direção E-W a ENE, com médio ângulo de mergulho, espaçamentos mínimo e máximo iguais a 1,5 e 37 m, respectivamente, apresentando fraturas contínuas (decamétricas), com terminações apenas nas fraturas de baixo ângulo, sendo considerado o grupo de menor importância para a circulação da água subterrânea.

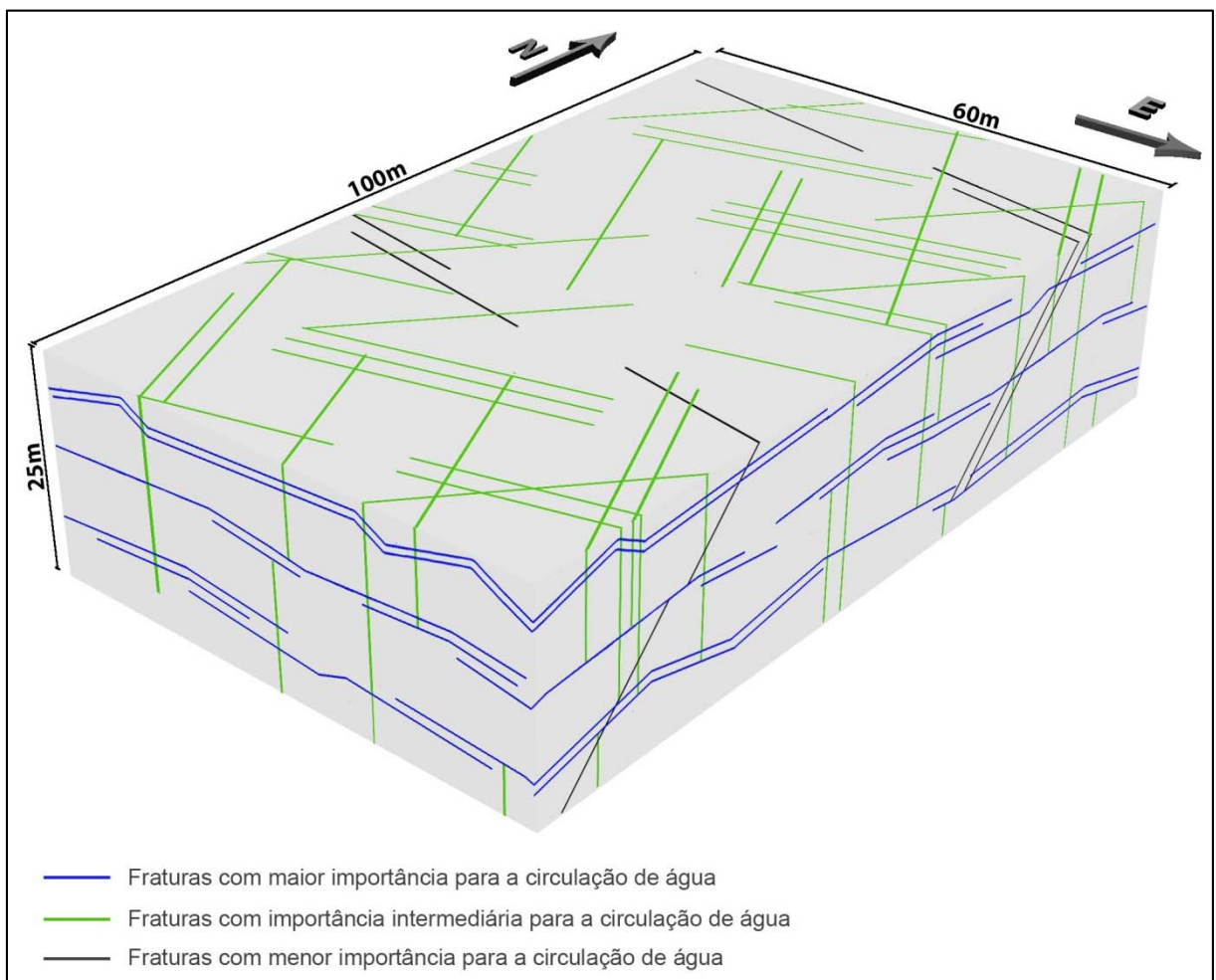


Figura 65 - Modelo conceitual de circulação de água subterrânea com representação da rede de fraturas e da importância relativa dos grupos de fraturas em relação ao fluxo; para cada grupo de fraturas foi representado o menor e o maior espaçamento, de modo que as fraturas podem ocorrer com qualquer espaçamento entre estes apresentados

5. CONCLUSÕES

A análise estrutural em afloramentos levou à caracterização dos seguintes grupos de fraturas:

- Fraturas híbridas de direção NW a NNW e mergulho subvertical, geradas em regime transcorrente com σ_1 N20-40W (T- σ_1 NW), sendo o único comum a todos os afloramentos;

- Fraturas extensionais de direção E-W a ENE e mergulho subvertical, geradas em regime extensional com σ_3 N-S (E- σ_3 N-S), presentes nas pedreiras GS-3 e GS-4;

- Fraturas de cisalhamento de direção E-W a ENE e mergulho em torno de 60°, relacionadas ao evento anterior, E- σ_3 N-S, presentes nas pedreira GS-2, GS-3 e GS-4;

- Fraturas de cisalhamento de direção E-W e mergulho em torno de 30°, geradas em regime compressivo com σ_1 N-S (C- σ_1 N-S), com ocorrência essencialmente na pedreira GS-4 e com algumas representantes na GS-3;

- Fraturas de cisalhamento de direção tendendo para NNE, com baixo ângulo de mergulho (inferior a 30°), geradas em regime compressivo com σ_1 WNW (C- σ_1 WNW), identificadas apenas na GS-1;

- Fraturas de direção NE e mergulho subvertical, cujo modo de propagação e regime tectônico não puderam ser identificados, mas que podem ser relacionadas a um evento transcorrente, ocorrendo nas pedreiras GS-3 e GS-4.

- Fraturas de direção N-S e mergulho médio, configurando dois grupos distintos, um mergulhando para E e outro para W, perpendiculares entre si, que ocorrem apenas na GS-2. As fraturas com mergulho para oeste resultaram da reativação de estruturas pré-existentes, como veios e foliação; a ortogonalidade entre estes dois grupos sugere que eles estejam geneticamente relacionados, no entanto, o mecanismo que proporcionou esta relação é desconhecido.

Para os eventos tectônicos citados acima, foi obtida a seguinte ordem cronológica, do mais antigo para o mais recente: E- σ_3 N-S, C- σ_1 WNW, T- σ_1 NW e C- σ_1 N-S. Tais eventos foram comparados com os eventos tectônicos mais recentes propostos na literatura (principalmente cenozoicos), para verificar se alguns dos grupos de fraturas identificados estariam relacionados a estes últimos. No entanto,

verificou-se que não houve correlação e os eventos identificados foram, então, considerados como mais antigos àqueles apresentados na literatura.

A partir da análise estrutural dos dados de perfilagens de poços, foram identificados cinco grupos de fraturas: sendo três de mergulho maior que 60° e de direção E-W a ENE, NE e N-S a NNW; um de mergulho entre 30° e 60° e direção E-W a WNW; e outro com mergulho predominantemente entre 10° e 40° e direção entre NNE e NE, muitas vezes paralelo à foliação. Todos estes grupos puderam ser relacionados com aqueles presentes nos afloramentos, havendo apenas diferenças com relação ao grupo de baixo ângulo e direção NNE do afloramento GS-1, que nos poços ocorre associado à foliação e possui uma maior variação no ângulo de mergulho (atingindo até 60°). É importante salientar que o grupo de direção N-S a NNW e mergulho alto, bem definido nos poços, pode ser correlacionável às fraturas NNW dos afloramentos, provavelmente, conjugadas das NW, ambas subverticais. Estas, por sua vez, são bastante frequentes nos afloramentos e subordinadas nos poços, provavelmente, devido à subamostragem.

Com relação ao espaçamento obtido para os grupos presentes nos afloramentos e na área dos poços, verificou-se que, de maneira geral, os espaçamentos obtidos nos poços ocorrem dentro da ordem de grandeza daqueles obtidos nos afloramentos. Porém, devido à maior quantidade de dados analisados, considera-se que os espaçamentos obtidos nos afloramentos, para os grupos subverticais e de médio ângulo, são mais representativos do que aqueles obtidos através das perfilagens. No entanto, o oposto ocorre para o grupo de baixo ângulo, que nos poços está associado à foliação. Sendo assim, os grupos em ordem crescente de espaçamento, considerando o menor e o maior espaçamento obtido para cada grupo, são: NNE a NE/ baixo ângulo (1 - 6,5 m), E-W a ENE/vertical (2,5 - 12,5 m), NW a NNW/vertical (2,5 - 14 m), E-W a WNW/médio (1,5 - 37 m) e NE/vertical (15 - 32 m).

De acordo com as feições indicativas de fluxo, observadas nos afloramentos, e os resultados do *flowmeter*, os grupos de fraturas foram classificados de acordo com a sua importância para o fluxo da seguinte forma: grupo E-W a WNW e mergulho médio, com a menor importância; os três grupos subverticais (E-W a ENE, NE e NW a NNW), todos com importância intermediária, não sendo possível identificar a hierarquia entre eles; e o grupo de direção NNE a NE e baixo ângulo, com a maior importância. Este resultado é compatível com o campo de esforços

atuais, segundo regime compressivo e σ_1 de direção NE, em que as fraturas mais favoráveis ao fluxo são perpendiculares ao σ_3 e, portanto, são de baixo ângulo.

Entretanto, segundo a literatura, existem outras possibilidades para o campo de esforços atuais, podendo configurar um regime transcorrente com σ_1 segundo NE ou E-W, em que as falhas de alto ângulo seriam mais favoráveis ao fluxo. As vazões muito altas relacionadas às fraturas NNE-NE de médio ângulo, identificadas em um dos poços, possivelmente estejam relacionadas a estes outros campos de esforços.

Com base na caracterização dos principais grupos de fraturas que compõem o Aquífero Cristalino - principalmente com relação a direções, espaçamentos e terminações - e na importância relativa de tais grupos para o fluxo, foi elaborado o modelo conceitual de circulação de água subterrânea. Tal modelo proposto deverá servir de base para as etapas seguintes de investigação do transporte de contaminantes, na área de estudo.

Como recomendações para posterior aprimoramento do modelo conceitual, sugere-se:

- Representação tridimensional da rede de fraturas a partir de modelo computacional, estocástico, realizado através do FracMan;

- Realização de perfilagens com o *flowmeter* em condições de bombeamento, para que a vazão relativa à cada fratura seja detectada, independentemente dos gradientes hidráulicos naturais, e assim, obter com maior segurança a relação entre os grupos mais transmissivos;

- Realização de perfilagens geofísicas (principalmente cáliper, imageamentos óptico e acústico e *flowmeter*) em três poços inclinados, orientados com um ângulo de 120° entre si e com mergulho de 45°, para poder caracterizar mais realisticamente, os principais grupos de fraturas presentes, independentemente da orientação e do ângulo de mergulho de suas fraturas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.F.M. 1967. *Origem e evolução da plataforma brasileira*. Rio de Janeiro, DNPM-DGM, Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia 241, 36 p.

ALMEIDA, F. F. M. 1976. The system of Continental Rift bordering the Santos Basin, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 48, Suplemento, p. 15-26.

ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A. 1977. As províncias estruturais brasileiras. *In: Sociedade Brasileira de Geologia, Simpósio de Geologia do Nordeste*, 8, Atas, p. 363-391.

ANDERSON, E.M. 1951. *The dynamics of faulting*. Oliver and Boyd, Edinburgh, 206 p.

ALVES, F.M. 2008. Tectônica rúptil aplicada ao estudo de aquífero em rochas cristalinas fraturadas na região de Cotia. Dissertação (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 116 p.

ASSUMPÇÃO M.; LOPER A.E.V.; ZEVALLOS I.; FERREIRA J.M.; NASCIMENTO A. 2011. Intraplate stress field in Brazil from earthquake focal mechanisms. *In: Conferencia Internacional en Homenaje a Alberto Giesecke*, CERESIS, 12 p.

BABINSK, M.; TASSINARI, C.C.G.; NUTMAN, A.P.; SATO, K.; MARTINS, P.O.R.; IYER, S.S. 2001. U/Pb SHRIMP zircon ages of migmatites from the basement of the Embu Complex, Ribeira Fold Belt, Brazil: indications for ~1.4 - 1.3 Ga Pb-Pb and Rb-Sr "isochron" ages of no geological meaning. *In: SERNAGEOMIN, Simposio Sudamericano en Geología Isotópica*, 3, Atas, p. 91-93.

BARTON, C.A.; ZOBACK, M.D.; MOOS, D. 1995. Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology*, **23(8)**: 683-686.

BALL, D. F. & HERBERT, R. 1992. The use and performance of collector wells within the regolith aquifer of Sri Lanka. *Ground Water*, **30**: 683-689.

BERTACHINI, A.C. 1987. Estudo das características hidrogeológicas dos terrenos cristalinos sob clima úmido, na região de Jundiá. Dissertação (Mestrado), Instituto de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 180 p.

BRIZ-KISHORE, B.H. 1993. Assessment of yield characteristics of granitic aquifers in South India. *GroundWater*, **31(6)**:921-928.

BRYANT, H.L. 1960. Production well logging techniques. *Geophysics*, **25(4)**: 905-927.

CAINE, J.S.; EVANS, J.P.; FORSTER, C.B. 1996. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, **24(11)**: 1025-1028.

CARRERA, J.; ALCOLEA, A.; MEDINA, A.; HIDALGO, J.; SLOOTEN, L.J. 2005. Inverse problem in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, **13**: 206-222.

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.

CORDANI, U.G.; COUTINHO, J.M.V.; NUTMAN, A.P. 2002. Geochronological constraints on the evolution of the Embu Complex, São Paulo, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **14**: 903-910.

COSGROVE, J. 1998. The role of structural geology in reservoir characterization. In: COWARD, M.P.; DALTABAN, T.S.; JOHNSON, H. (eds.) *Structural geology in reservoir characterization*. Geological Society, London, Special Publication, p.: 1-13.

COUTINHO, J.M.V. 1980. Carta geológica da região metropolitana da Grande São Paulo. São Paulo, EMLASA, mapa geológico, 1:100000, 2 fl.

DERSHOWITZ, W.S.; LEE, G.; GEIER, J.; LAPOINTE, P.R. 1998. FracMan: interactive discrete feature data analysis, geometric modelling and exploration simulation. User Documentation. Golder Associates Inc, Seattle.

DOMENICO, P. & SCHWARTZ, F. 1990. *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley & Sons, Nova York, 824 p.

ENGELDER, T.; FISCHER, M.P.; GROSS, M.R. 1993. Fracture Partitioning: failure mode as a function of lithology. In: Geological Society of America, Annual Meeting, *Geological Aspects of Fracture Mechanics (a short course manual)*, 281 p.

FERNANDES, A. J. 1991. O Complexo Embu no leste do estado de São Paulo: contribuição ao conhecimento da litoestratigrafia e da evolução estrutural e metamórfica. Dissertação (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 120 p.

FERNANDES, A.J. 1997. Tectônica cenozóica na porção média da bacia do rio Piracicaba e sua aplicação a hidrogeologia de meios fraturados. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 244 p.

FERNANDES, A.J. 2008. Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. *Revista do Instituto Geológico*, **29(1)**: 49-72.

FERNANDES, A.J. & RUDOLPH, D.L. 2001. The influence of cenozoic tectonics on the groundwater-production capacity of fractured zones: a case study in São Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal*, **9**: 151-167.

FERNANDES, A. J. & AMARAL, G. 2002. Cenozoic tectonic events at the border of the Parana Basin, São Paulo, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **14(8)**: 911-931.

FERNANDES, A.J. & MELLO, C.L. 2004. Coberturas cenozóicas e estruturas deformadoras na depressão periférica paulista, Campinas, São Paulo. *Revista do Instituto Geológico*, **25(1)**: 49-66.

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: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 15, Suplemento.*

FERNANDES, A.J.; PERROTA, M.M.; SALVADOR, E.D.; AZEVEDO, S.G.; GIMENEZ FILHO, A.; STEFANI, F.L.; PAULON, N. 2005. Aquíferos fraturados. *In: Governo do Estado de São Paulo (ed.) Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo (escala 1:1.000.000). DAEE/IG/IPT/CPRM, p.: 66-84.*

FERNANDES, A.J., MALDANER, C.H., AZEVEDO SOBRINHO, J.M., PRESSINOTTI, M.M.N., WAHNFRIED, I. 2010. Estratigrafia dos derrames de basaltos da Formação Serra Geral (Ribeirão Preto – SP) baseada na geologia física, petrografia e geoquímica. *Geologia USP, Série Científica*, **10(2)**: 73-99.

FERRIL, D.A.; WINTERLE, J.; WITTMEIER, G.; SIMS, D.; COLTON.S.; ARMSTRONG, A; MORRIS, A.P. 1999. Stressed rock strains groundwater at Yucca Mountain, Nevada. *GSA Today*, **9(5)**:1-8.

FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (FUSP). 2002. Plano de Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. Caderno Técnico Institucional.

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, Proceedings, p. 1343-1369.*

GEOLOGICAL SURVEY (U.S.) 2007. *Borehole geophysical logging of water-supply wells in the Piedmont, Blue Ridge, and Vally and Ridge, Georgia*. Geological Survey, USGS Fact Sheet 2007-3048, 4 p.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO (Estado). 2009. *Projeto Jurubatuba: restrição e controle de uso de água subterrânea*. São Paulo: DAEE/IG, Cadernos do Projeto Estratégico Aquíferos, n.1, 109 p.

GROHMANN, C.H.; RICCOMINI, C.; ALVES, F.M. 2008. Aplicações dos modelos de elevação SRTM em geomorfologia. *Revista Geográfica Acadêmica*, **2**: 73-83.

GUERRA, K.J. 2010. Aplicação de método geofísico em estudo hidrogeológico no município de Nova Lima - MG: caracterização de aquíferos em área urbana. Dissertação (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 116 p.

HANCOCK, P.L. 1985. Brittle microtectonics: principles and practice. *Journal of Structural Geology*, **7(3)**: 437-457.

HASUI, Y. 1975. Evolução polifásica do Pré-Cambriano oeste da capital paulista. *Boletim IG*, **6**: 95-107.

HASUI, Y.; DANTAS, A.S.; CARNEIRO, C.D.R.; BISTRICHI, C.A. 1981. O Embasamento Pré-Cambriano e Eopaleozóico em São Paulo. *In*: São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT, mapa geológico, escala 1:500.000, p.12-45 (nota explicativa).

HASUI, Y. 1983. Aspectos geológicos essenciais na seção Caconde-Caraguatatuba e suas implicações na reconstituição da organização e evolução do Pré-Cambriano do Leste Paulista. *In*: Jornada sobre a carta geológica do Estado de São Paulo em 1:50.000. PRÓ-MINERIO, 1, Atas, p. 227-252.

HASUI, Y. & SADOWSKI, G.R. 1976. Evolução geológica do pré-cambriano na região sudeste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, **6(3)**: 180-200.

HEILBRON, M., PEDROSA-SOARES, A.C., CARLOS, L., ALLARD, R., TROUW, J. 2004. Província Mantiqueira. *In*: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO-NEVES, B. B. (eds.). *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, p. 203-234.

HENNIES, W.T.; HASUI, Y.; PENALVA, F. 1967. O falhamento transcorrente de Taxaquara. *In*: Sociedade Brasileira de Geologia, Congresso Brasileiro de Geologia, 21, *Anais*, p. 159-168.

HESS, A.E. 1986. Identifying hydraulically conductive fractures with a slow-velocity borehole flowmeter. *Canadian Geotechnical Journal*, **23**: 69-78.

HESS, A.E. & PAILLET, F.L. 1990. Applications of the thermal-pulse flowmeter in the hydraulic characterization of fractured rocks. *In*: PAILLET, F.L. & SAUNDERS, W.R. (eds.) *Geophysical applications for geotechnical investigations*. American Society Testing Materials, STP 1101, p.: 99-112.

HIRATA, R. & FERREIRA, L. 2001. Os aquíferos da bacia hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. *Revista Brasileira de Geociências*, **31(1)**: 43-50.

JACQUES, P.D. 2013. Tectônica transcorrente mesozoica-cenozoica na borda leste da Bacia do Paraná, Estado de Santa Catarina. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 232 p.

JANASI, V.A. & ULBRICH, H.H.G.J. 1992. *Inventário bibliográfico de granitos no Estado de São Paulo*. São Paulo, Boletim IG-USP, Publicação Especial, 11, 253 p.

JANASI, V.A.; ALVES, A.; VLACH, S.R.F.; LEITE, R.J. 2003. Granitos peraluminosos da porção central da Faixa Ribeira, Estado de São Paulo: sucessivos eventos de reciclagem da crosta continental no Neoproterozoico. *Geologia USP, Série Científica*, **3**: 13-24.

JOHNSON, C.D. & WILLIAMS, J.H. 2003. Hydraulic logging methods - A summary and field demonstration in Conyers, Rockdale County, Georgia. *In*: Williams, L.J. (ed.) *Methods used to assess the occurrence and availability of ground water in fractured-crystalline bedrock - An excursion into areas of Lithonia Gneiss in eastern metropolitan Atlanta, Georgia*. Georgia Geologic Survey, Guidebook 23, p.: 40-47.

JOHNSON, C.D.; HAENI, F.P.; LANE JR, J.W.; WHITE, E.A. 2002. *Borehole-geophysical investigation of the University of Connecticut landfill, Storrs, Connecticut*. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 01-4033, 50 p.

KEYS, W. S. 1968. Well Logging in Ground-Water Hydrology. *Ground Water*, **6**: 10-18.

KEYS, W.S.1979. Borehole geophysics in igneous and metamorphic rocks. *In*: Society of Professional Well Log Analysts, Annual Logging Symposium, 20, *Transactions*, p. 1-26.

KEYS, W. S. 1990. *Borehole geophysics applied to ground-water investigations*. US Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 2, Chapter E2, 149 p.

KIRALY, L. 1970. Statistical analysis of fractures (orientation and density). *Geol. Rclsch.*, **59**: 125-151.

L'APICCIRELLA, E.S.P. 2009. Contaminação e áreas de restrição de uso de água subterrânea no entorno do canal Jurubatuba em São Paulo - SP. Dissertação (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 125 p.

LAWN, B.R. & WILSHAW, T.R. 1975. *Fracture of brittle solids*. Cambridge University Press, Cambridge, 204 p.

LOISELLE, M. & EVANS, D. 1995. Fracture density distributions and well yields in Coastal Maine. *Ground Water*, **33(2)**: 190-196.

LOUSADA, E.O. & CAMPOS, J.E.G. 2005. Propostas de modelos hidrogeológicos conceituais aplicados aos aquíferos da região do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geociências*, **35(3)**: 407-414.

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 (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 104 p.

MILSON, J. (Ed.) 2003. *Field Geophysics*. John Wiley, New York, 225 p.

MONTEIRO, M.D.; GURGUEIRA, M.D.; ROCHA, H.C. 2012. Geologia da Região Metropolitana de São Paulo. *In: ABMS, Seminário Twin Cities: Solos das regiões metropolitanas de São Paulo e Curitiba*, 1, p. 15-43.

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.

MORIN, R.H.; CARLETON, G.B.; POIRIER, S. 1997. Fractured-aquifer hydrogeology from geophysical logs; The Passaic Formation, New Jersey. *Ground Water*, **35(2)**: 328-338.

MORIN, R.H.; SENIOR, L.A.; DECKER, E.R. 2000. Fractured-aquifer hydrogeology from geophysical logs: Brunswick Group and Lockatong Formation, Pennsylvania. *Ground Water*, **38(2)**: 182-192.

NERY, G.G. & MACARI, R. 2006. Estudo do comportamento da perfilagem ótica e geofísica na Formação Serra Geral. *In: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, 14, Suplemento.

NEUMAN, S.P. 2005. Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks. *Hydrogeology Journal*, **13**: 124-147.

NOVAKOWSKI, K. 1995. Groundwater flow in fractured rocks. Waterloo Centre for Ground Water Research, Course Notes, 46 p.

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.; CHLES, 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 fracture hydrocarbon reservoirs. *Petroleum Geoscience*, **5**: 373-384.

O'LEARY, D.W.; FREIDMAN, J.D.; POHN, H.A. 1976. Lineament, linear, lineation: some proposed new definitions for old terms. Geological Society of America, Bulletin 87, p. 1463-1469.

OLIVEIRA, L.J. 2005. Avaliação do uso da perfilagem geofísica para obtenção de informações secundárias para utilização em co-estimativa de variáveis geológico-mineiras. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 144 p.

PAILLET, F.L. 1995. Using borehole flow logging to optimize hydraulic-test procedures in heterogeneous fractured aquifers. *Hydrogeology Journal*, **3**: 4-20.

PAILLET, FL. & OLLILA, P. 1994. *Identification, characterization and analysis of hydraulic conductive fractures of granitic basement rocks, Massachusetts*. U.S. Geological Survey, Water Resources Investigation Report 94-4185, 38 p.

PAILLET, F.L.; BARTON, C.; LUTHI, S.; RAMBOW, F.; ZEMANEK, J. 1990. *Borehole Imaging*. Society of Professional Well Log Analysts, SPWLA Reprint Series, Houston, Texas, 472 p.

PAILLET, F.L.; CROWDER, R.; HESS, A.E. 1994. High resolution flowmeter logging - a unique combination of borehole geophysics and hydraulics. *In: Symposium on the application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Proceedings*, 381-404.

PAULA e SILVA, F. 2003. Geologia de subsuperfície e hidroestratigrafia do Grupo Bauru no Estado de São Paulo. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 166 p.

PINO, D.S. 2012. Structural Hydrogeology in the Kenogamy Uplands, Quebec, Canada. Thesis (Master), L'Université du Québec à Chicoutimi, Quebec, 184 p.

PRICE, N.J. & COSGROVE, J.W (eds.). 1990. *Analysis of geological structures*. Cambridge University Press, Cambridge, 502 p.

PRIEST, S.D. 1993. *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman & Hall, London, 473 p.

REIS, M.N.E. 2008. Fenômenos de Transporte. PUC Minas, Belo Horizonte, Apostila, 168 p.

RICCOMINI, C. 1989. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 256 p.

RICCOMINI, C. & COIMBRA, A. M. 1992. Geologia da Bacia Sedimentar. *In: NEGRO JR., A.; FERREIRA, A.A.; ALONSO, U.R.; LUZ, P.A. (eds.) Solos da Cidade de São Paulo*. ABMS/ABEF, p. 37-94.

RICCOMINI, C; SANT'ANNA, L.G.; FERRARI, A.L. 2004. Evolução geológica do rift continental do Sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO-NEVES, B.B. (eds.) *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, p. 383-405.

RIDEG, P. 1974. Geology of the Serra do Mar ridge. Thesis (PhD), University of New York, New York, 189 p.

ROSEN, L. & LEGRAN, H.E. 2000. Systematic makings of early stage hydrogeologic conceptuals models. *Groundwater*, **38**: 887-893.

ROULEAU, A. & GALE, J.E. 1985. Statistical characterization of the fracture system in the Stripa granite, Sweden. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **22(6)**: 353-367.

SALVADOR, E.D. & RICCOMINI, C. 1995. Neotectônica da região do alto estrutural de Queluz (SP-RJ, Brasil). *Revista Brasileira de Geociências*, **25**: 151-164.

SADOWSKI, G.R. & CAMPANHA, G.A.C. 2004. Grandes falhas no Brasil continental. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO-NEVES, B.B. (eds.) *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, p. 407-422.

SADOWSKI, G.R. & MOTIDOME, M.J. 1987. Brazilian Megafaults. In: HERVÉ, F. (eds.) *Megafaults of South America*. Revista Geológica do Chile, 31, SERNAGEOMIN, p. 61-75.

SILVA, R.T. & PORTO, M.F.A. 2003. Gestão urbana e gestão das águas: caminhos da integração. *Estudos Avançados*, **17(47)**: 129-146.

SNOW, D.T. 1968. Rock fracture spacings, openings, and porosities. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, **94**: 73-91.

STUMM, F.; CHU, A.; LANGE, A.D.; PAILLET, F.L.; WILLIAMS, J.H.; LANE Jr, J.W. 2001. *Use of advanced borehole geophysical techniques to delineate fractured-rock ground-water flow and fractures along water-tunnel facilities in northern Queens County, New York*. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 00-4276, 12 p.

STURZENEGGER, M.; STEAD, D.; ELMO, D. 2011. Terrestrial remote sensing-based estimation of mean trace length, trace intensity and block size/shape. *Engineering Geology*, **119**: 96-111.

SURRETTE, M.; ALLEN, D.M.; JOURNEAY, M. 2008. Regional evaluation of hydraulic properties in variably fractured rock using a hydrostructural domain approach. *Hydrogeology Journal*, **16**: 11-30.

TAKIYA, H. 1991. Aplicação de métodos quantitativos espaciais a dados geológicos da bacia de São Paulo. Dissertação (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 109 p.

TERZAGHI, R.D. 1965. Sources of error in joint surveys. *Géotechnique*, **15(3)**: 287-304.

TROUW, R.A.J.; HEILBRON, M.; RIBEIRO, A.; PACIULLO, F.V.P./ VALERIANO, C.M.; ALMEIDA, J.C.H.; TUPINAMBÁ, M.; ANDREIS, R.R. 2000. The central segment of the Ribeira Belt. *In*: CORDANI, U.G.; MILANI, E.J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D.A. (eds.) *Tectonic Evolution of South America*. 31st International Geological Congress. IUGS, p. 287-310.

UNESCO. 1984. *Ground water in hard rocks*. Paris, UNESCO, Studies and Reports in Hydrogeology 33, 228 p.

VIEIRA, S.R.S.S.; TASSINARI, C.C.G. 1988. Estudo petrológico e geocronológico das rochas da região de Embu-Guaçu, Estado de São Paulo. *In*: Sociedade Brasileira de Geologia, Congresso Brasileiro de Geologia, 35, *Atas*, p. 1391-1399.

VLACH, S.R.F. 2001. Microprobe monazite constraints for an early (ca. 790 Ma) Brasiliano orogeny: The Embu Terrane, Southeastern Brazil. *In*: *SERNAGEOMIN*, Simposio Sudamericano em Geología Isotópica, 3, *Atas*, p. 265-268.

VOECKLER, H. & ALLEN, D.M. 2012. Estimating regional scale fractured bedrock hydraulic conductivity using discrete fracture network (DFN) modeling. *Hydrogeology Journal*, **20(6)**: 1081-1100.

WANHFRIED, I. 2010. Modelo conceitual de fluxo do aquífero Serra Geral e do Sistema Aquífero Guarani na Região de Ribeirão Preto, SP. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 124 p.

WILLIAMS, J.H. & PAILLET, F.L. 2002. *Characterization of fractures and flow zones in a contaminated shale at the Watervliet Arsenal, Albany County, New York*. Geological Survey, Open-File Report 01-385, 25 p.

WILLIAMS, J.H. & JOHNSON, C.D. 2004. Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies. *Journal of Applied Geophysics*, **55**: 151-159.

ZAHNG, F.; ZHOU, Z.; HUANG, Y.; CHEN, Z. 2004. Determining the permeability of fractured rocks based on joint mapping. *Ground Water*, **42(4)**: 509-515.

ANEXO 1

Cabeçalho																		
Aflora/o (GS)	Data	Cond. externas		Alteração do aflor.		N°Bancada	Atitude Parede		N°Croqui	Foto Geral	Scanline							
											ID	Comprimento	Altura					
Responsáveis:																		
Litologia:																		
Ponto	UTM		ZF		Fratura		Ls		Alteração		Preench.	Plana/ Ond	Rugos.		Comp.	Termin.	Fotos	Observações
			Espess.	NF	DipDir	Dip	Plunge	Trend	Cor	Espess.			a	λ				

Nota explicativa da planilha		
ZF (Zona de Fratura)	Espess.	Espessura em metros
	NF	Numero de fraturas
DipDir		Sentido do mergulho da fratura
Dip		Ângulo de mergulho da fratura
Ls (estrias minerais)	Plunge	Ângulo de caimento
	Trend	Rumo
Alteração	Cor	Superfície ou rocha/ ocre, esverdeada, esbranquiçada
	Espess.	mm, dm, cm, dec
Preench.		Descrição de mineral (calcita, quartzo, clorita, epidoto, óxido de ferro) e cor (branco, verde, amarelo, preto, vermelho)
Plana/Ond		Planar, ondulada, suavemente curva
Rugosidade	a	Amplitude das irregularidades da superfície: milimétricas a centimétricas (mm, cm)
	λ	Comprimento de onda: milimétrica, decimétrica, centimétrica, decimétrica (mm, dm, cm, dcm)
Comprimento		Comprimento do maior traço visível, em metros. Não medir fraturas menores de 1 metro
Terminações		Anotar somente quando terminar em fratura, já colocando a atitude desta
Observações	Padrões: en echelon, em flor, conjugados, anastomosamento das fraturas (ZF), terminação ramificada (Y),	
	Presença de Indicadores cinemáticos (identificar o tipo: degraus em rocha, degraus em preenchimento, etc)	
	Sentido de movimento qdo houver Ls (D-dextral, S-sinistral, N-normal, I-inverso)	
	Presença de veio (precipitação a partir de fluido) ou dique (corpo intrusivo) junto à fratura	
	Outras medidas estruturais: foliação, eixo de dobra, plano axial	
	Presença de vegetação e/ou água ou na fratura	
Quando houver amostra coletada		

ANEXO 2











Parceiros:





LEGENDA

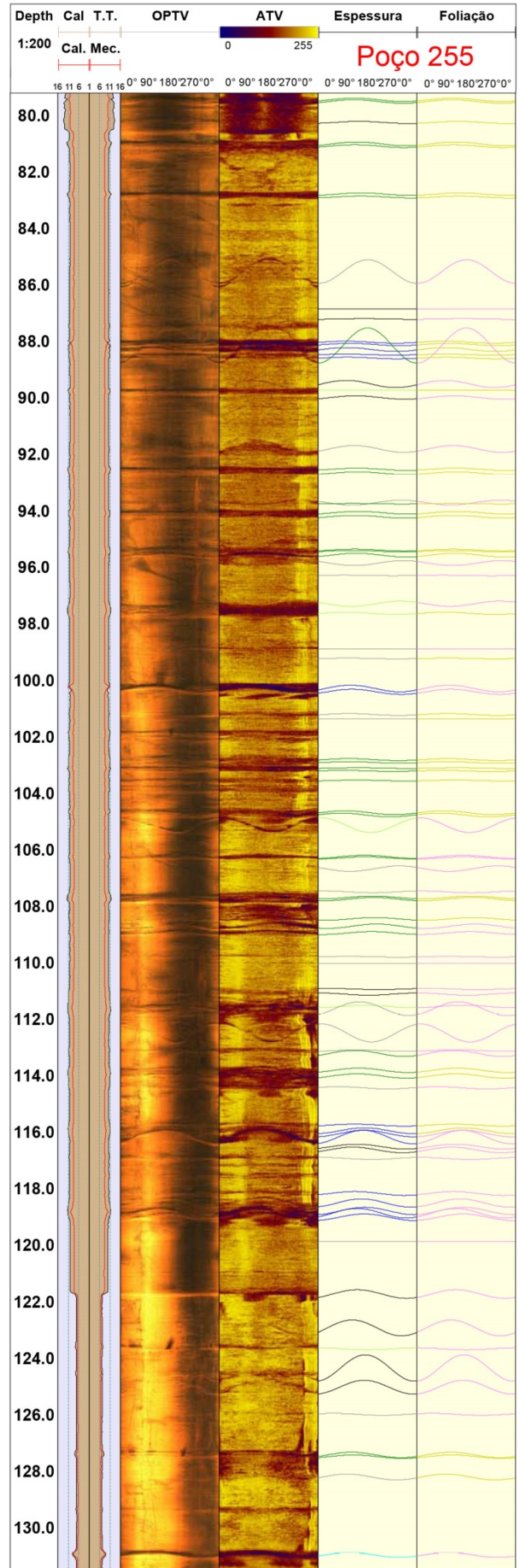
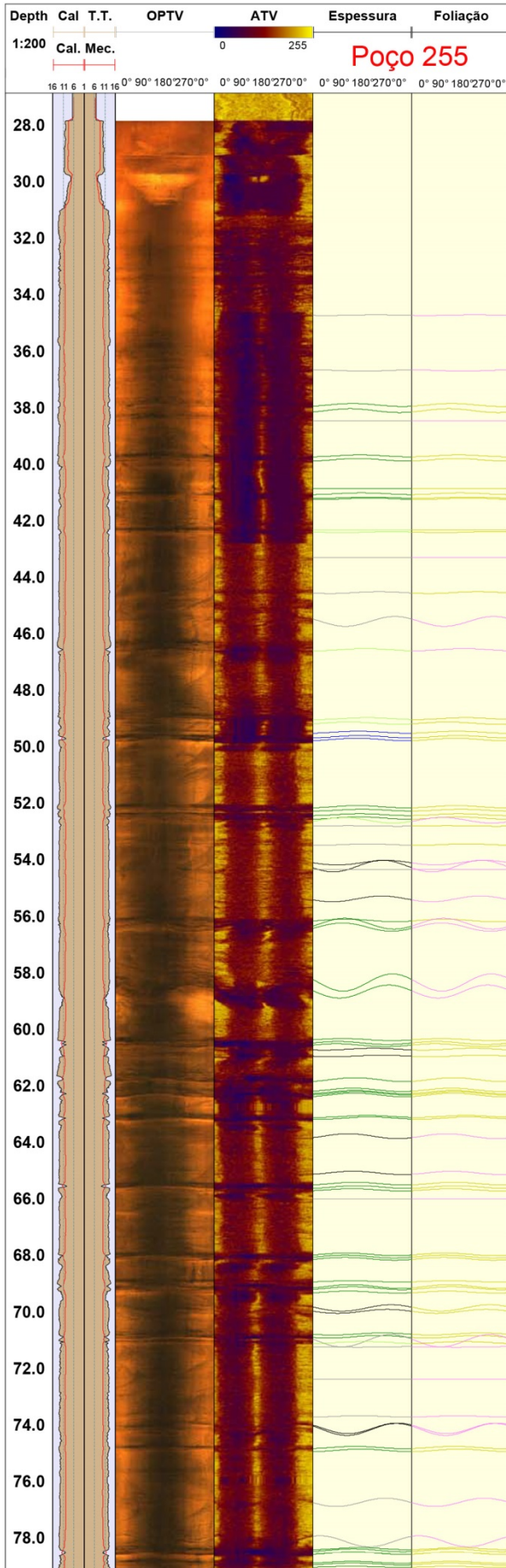
Fratura Projetada

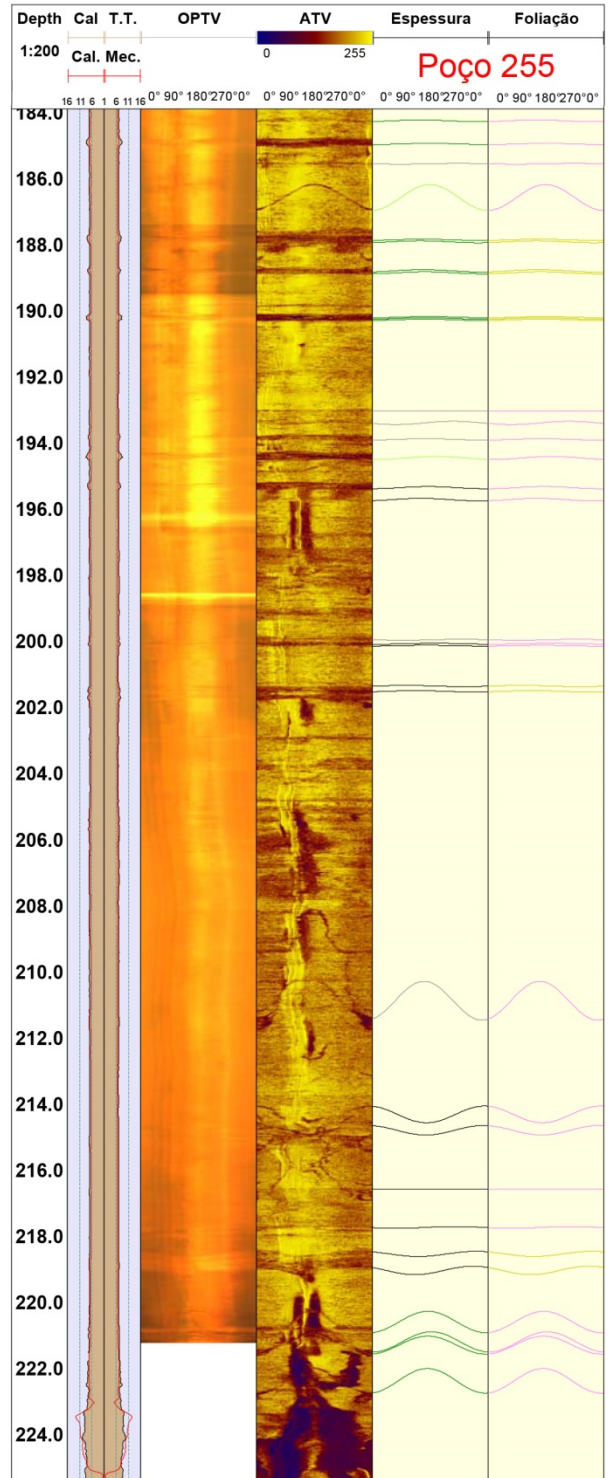
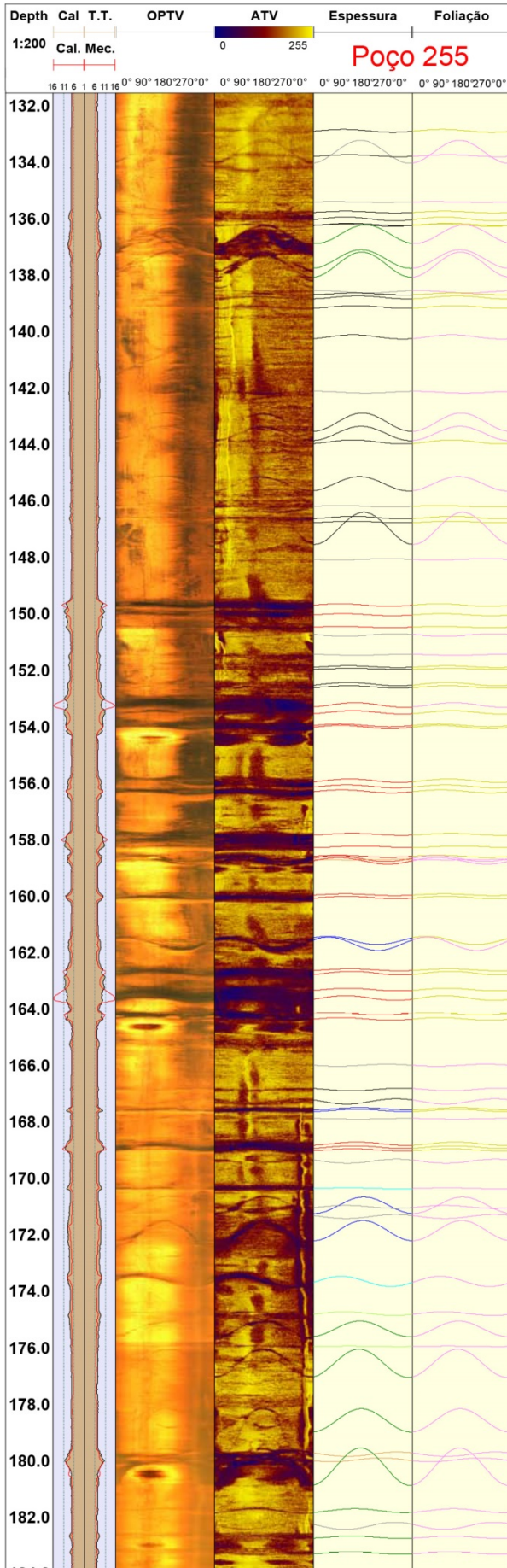
Espessura (aparente)

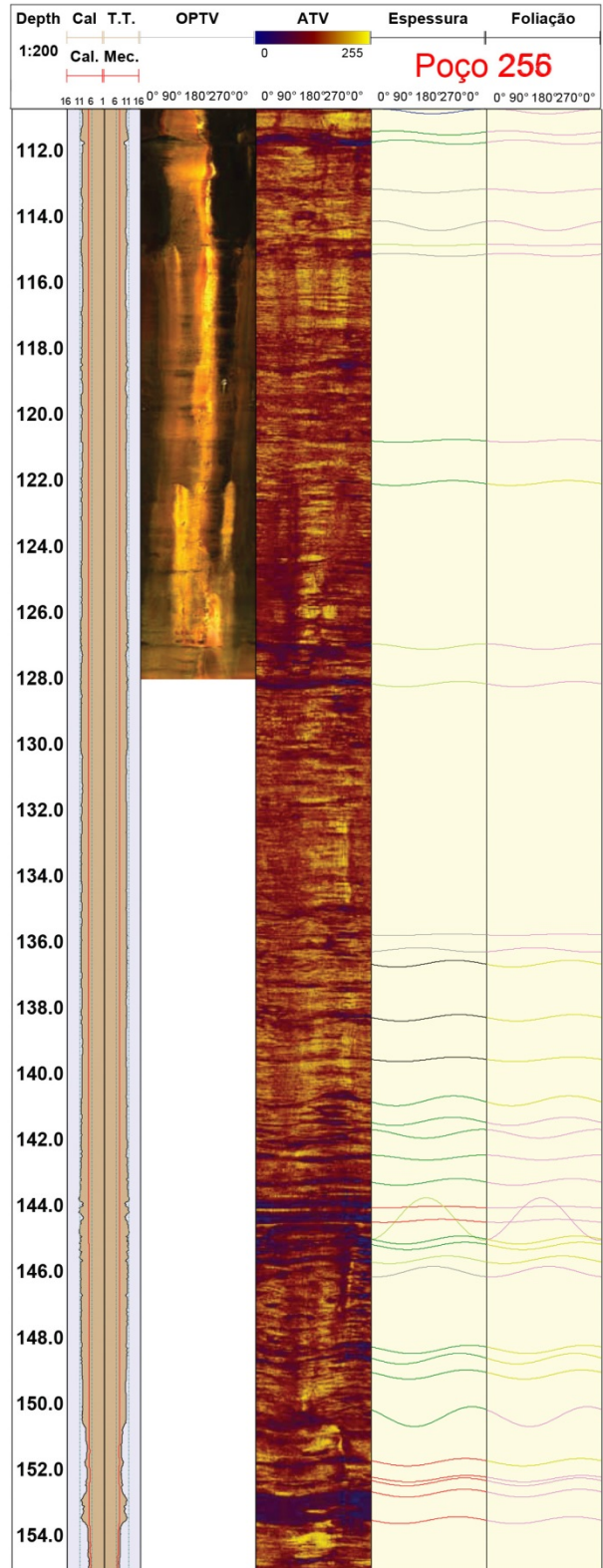
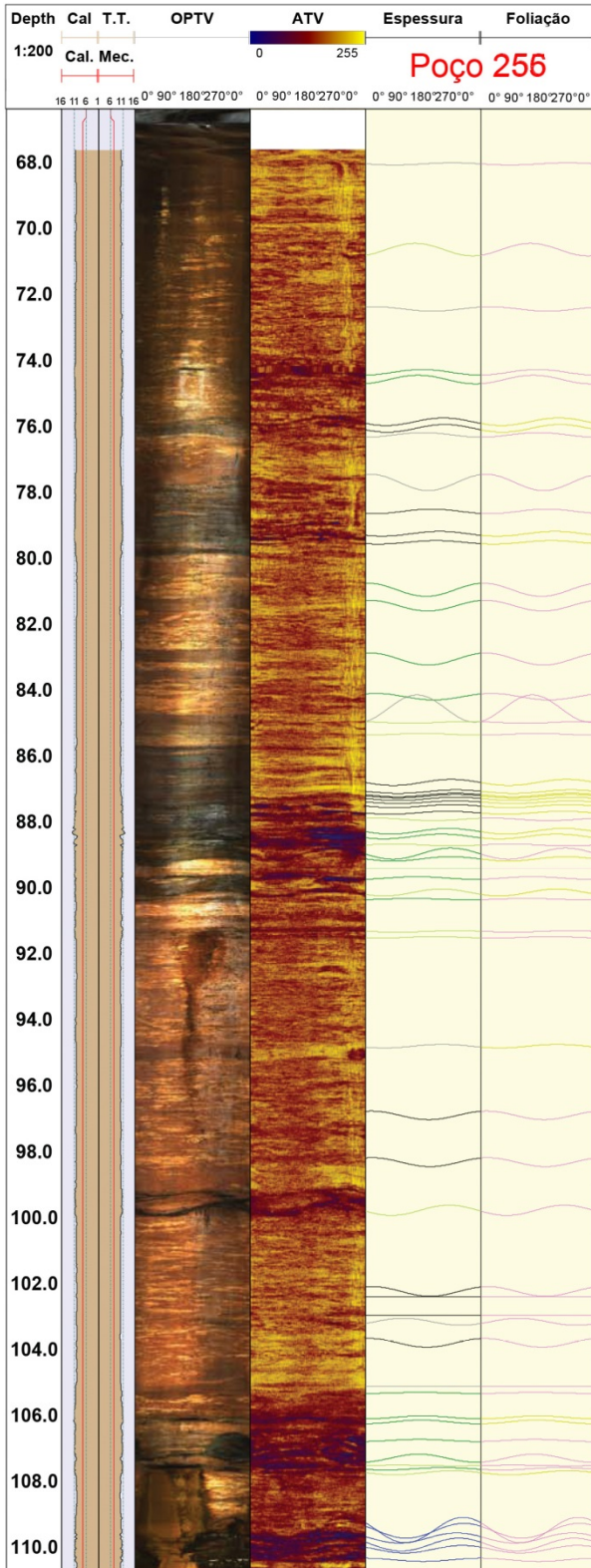
-  Fratura - Fechada
-  Zona - Todas fechadas
-  Fratura - Pouco espessa
-  Zona - Uma ou mais pouco espessa
-  Fratura - Espessura razoável
-  Zona - Uma ou mais com espessura razoável
-  Fratura - Espessura proeminente
-  Zona - Fraturas com espessura proeminente

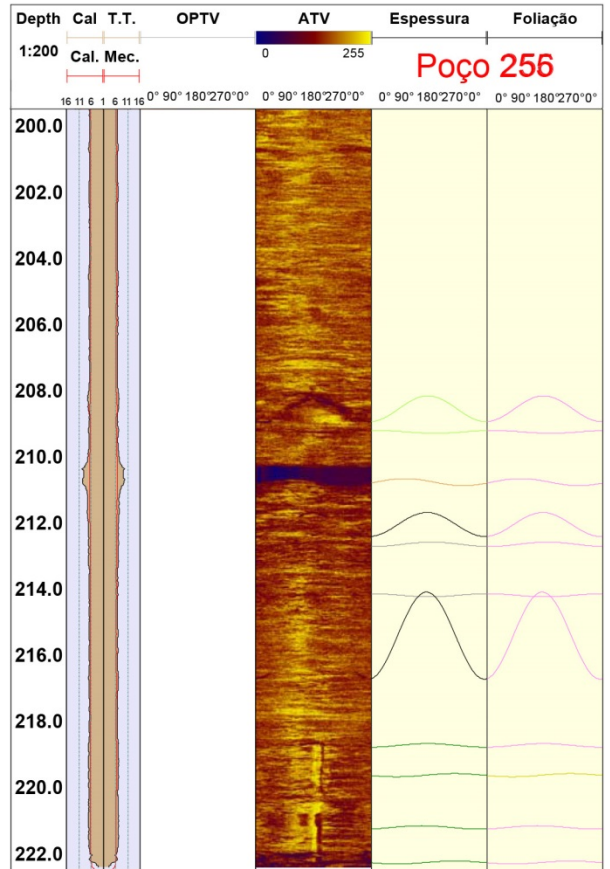
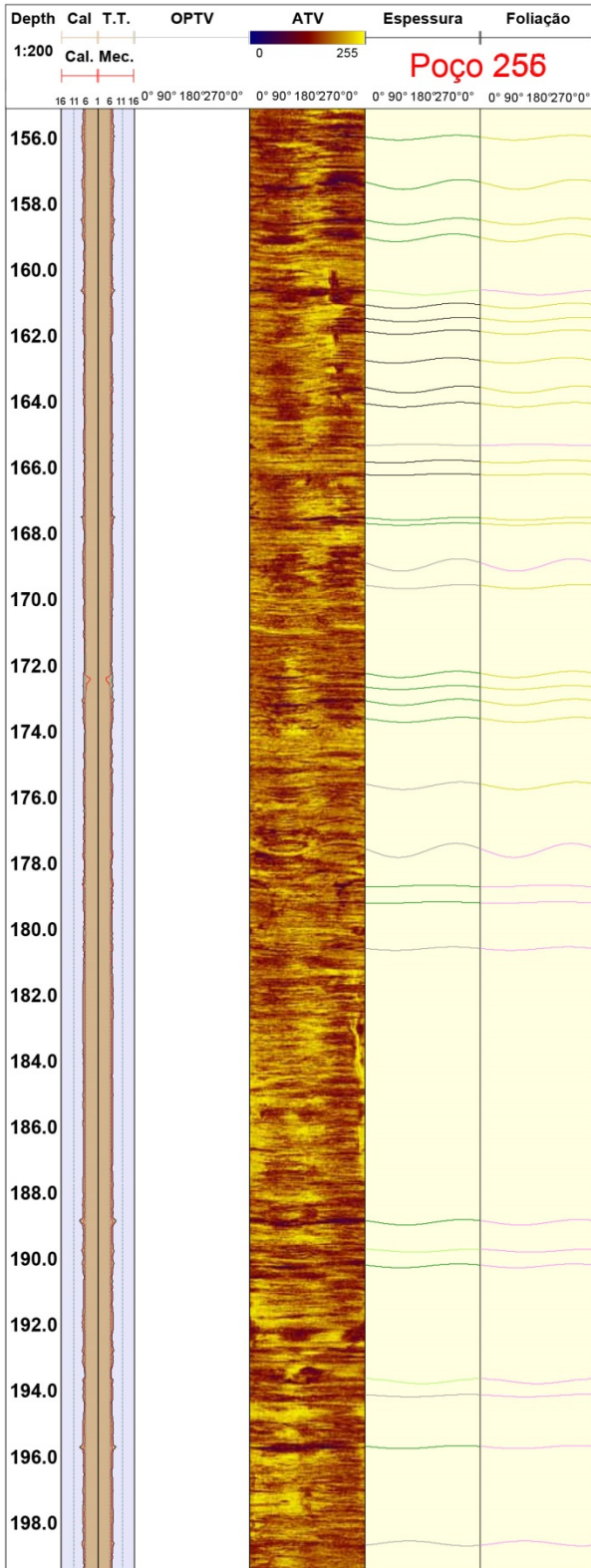
Foliação (paralela)

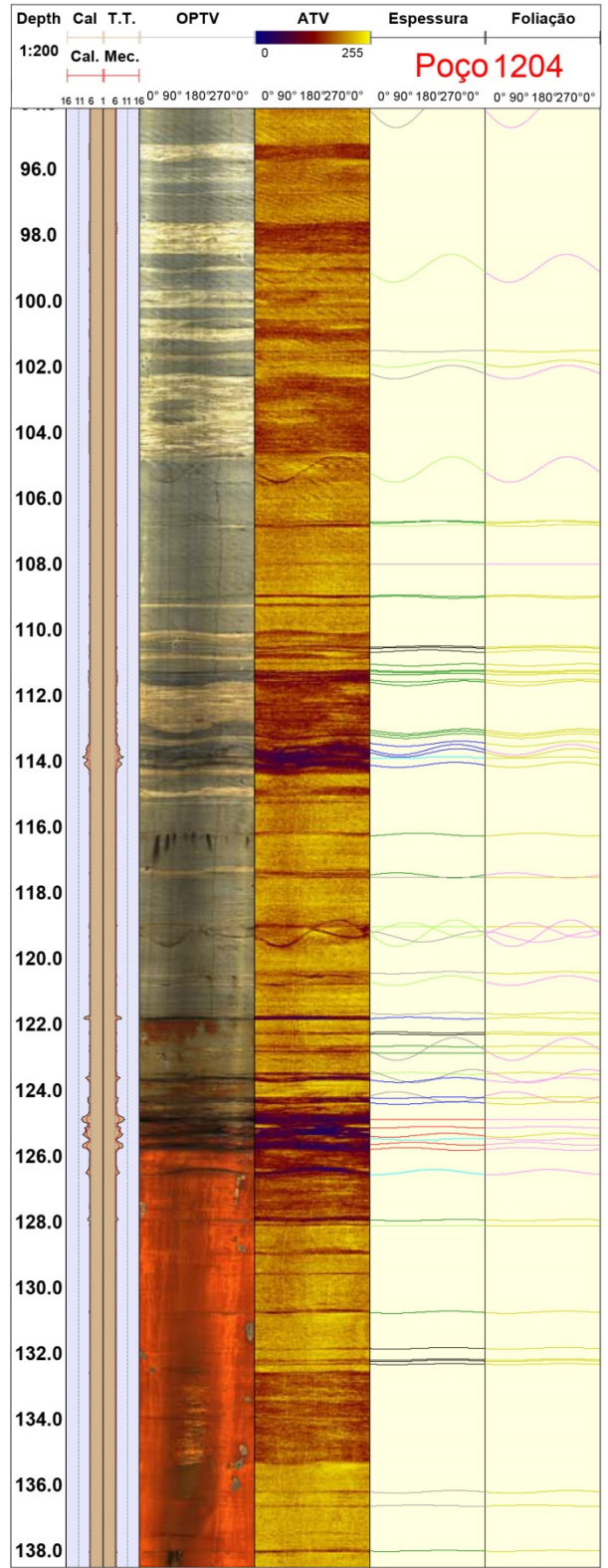
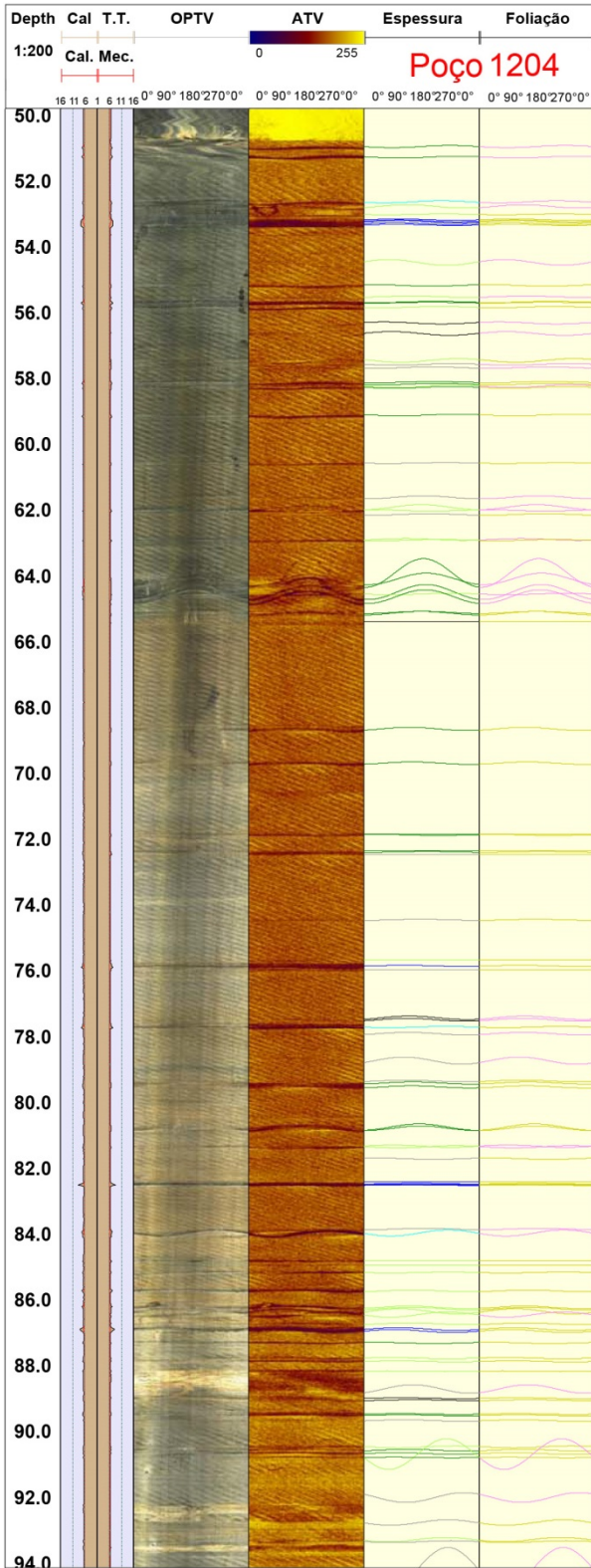
-  Sem foliação
-  Foliação paralela

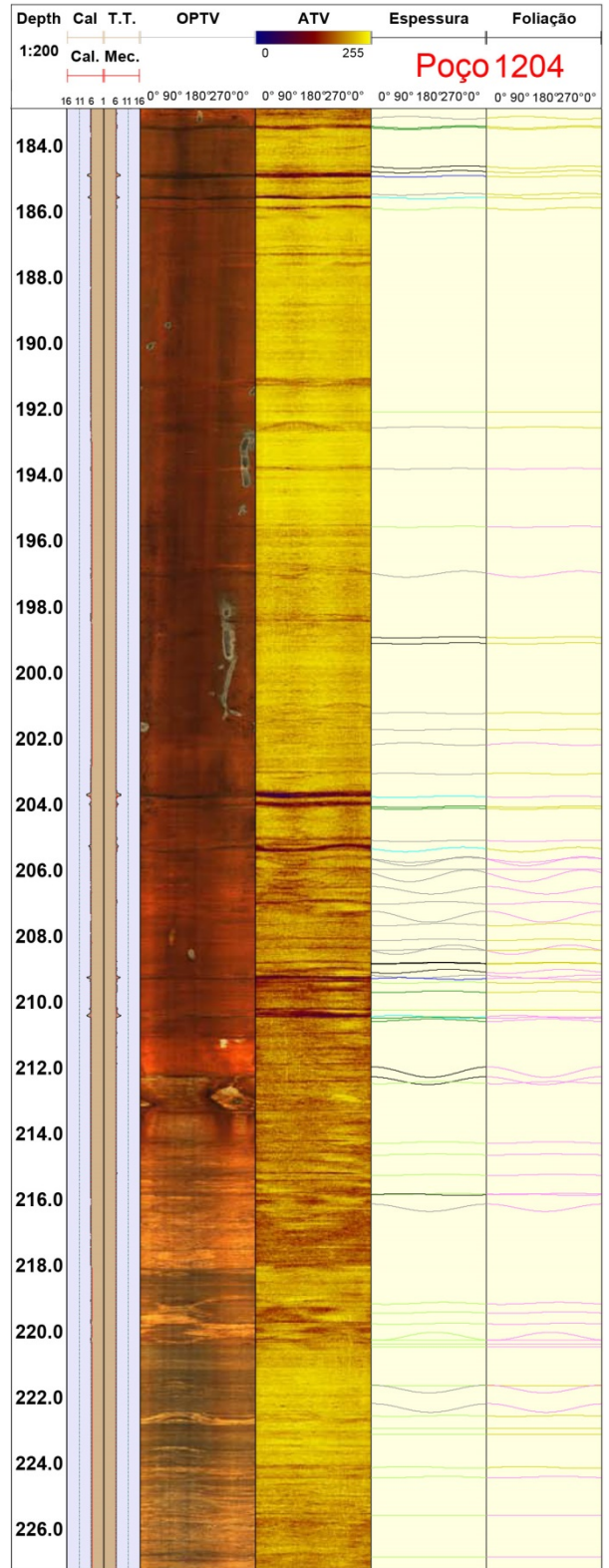
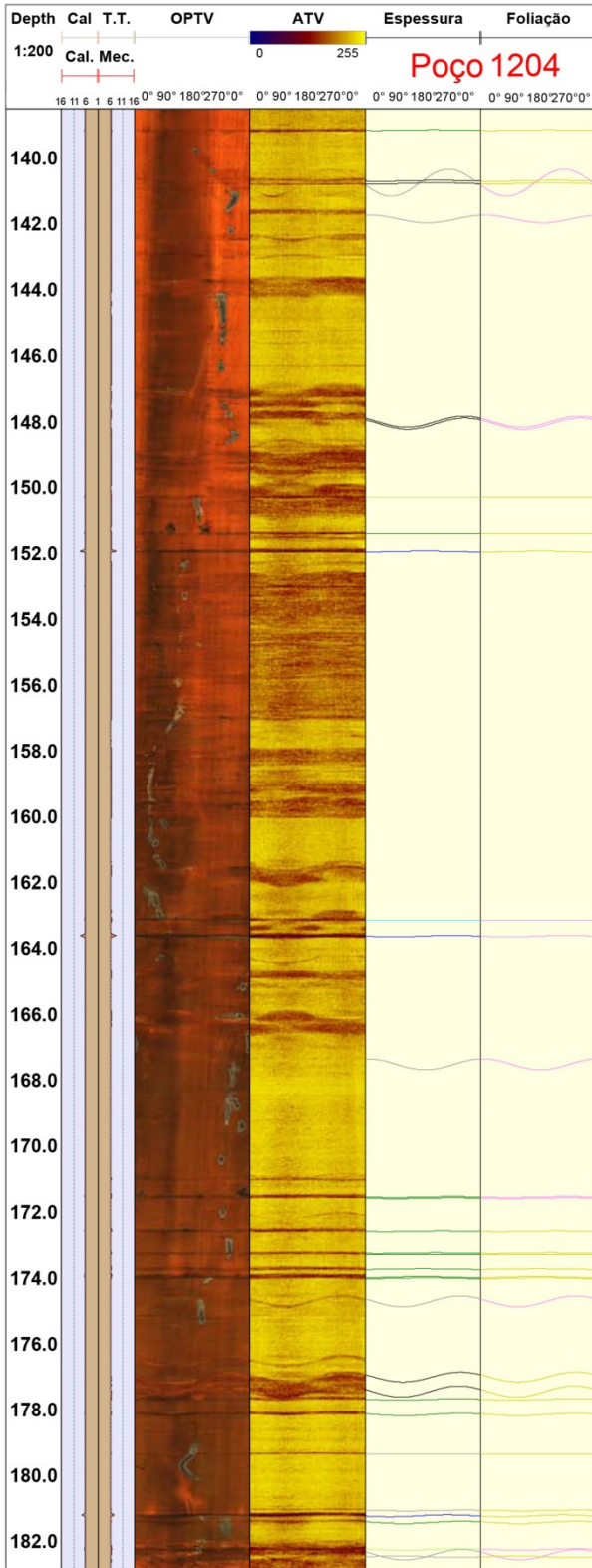


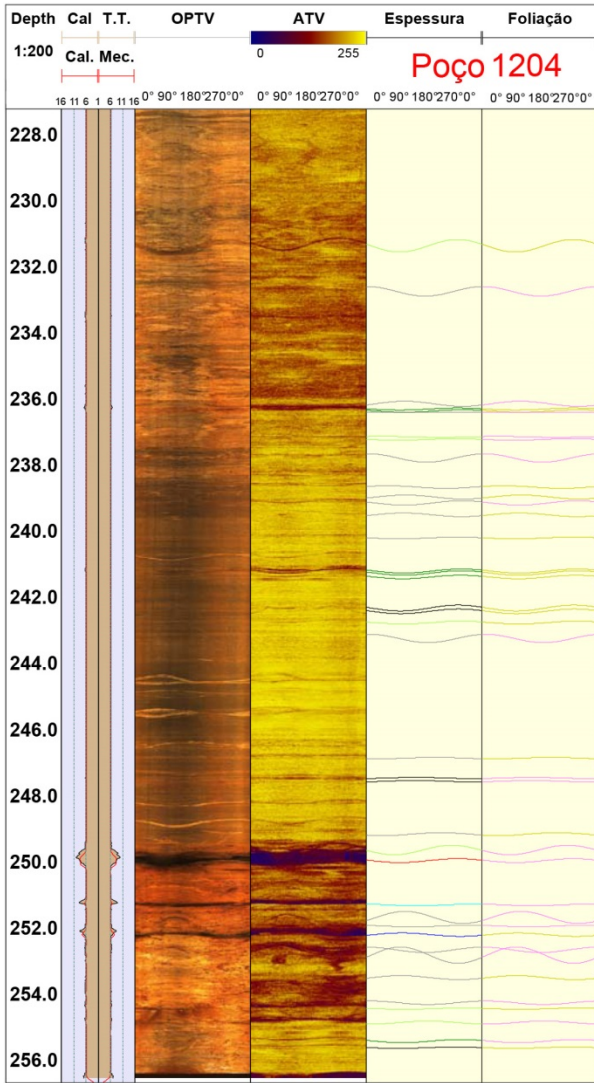


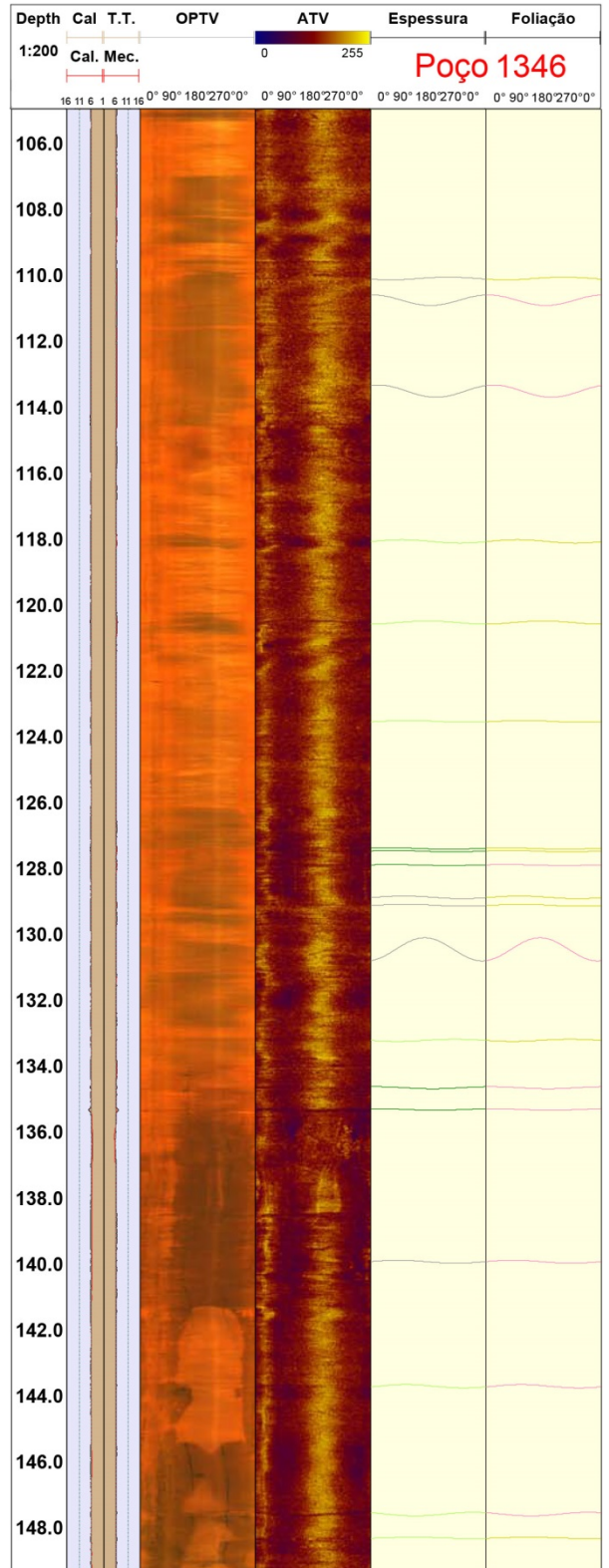
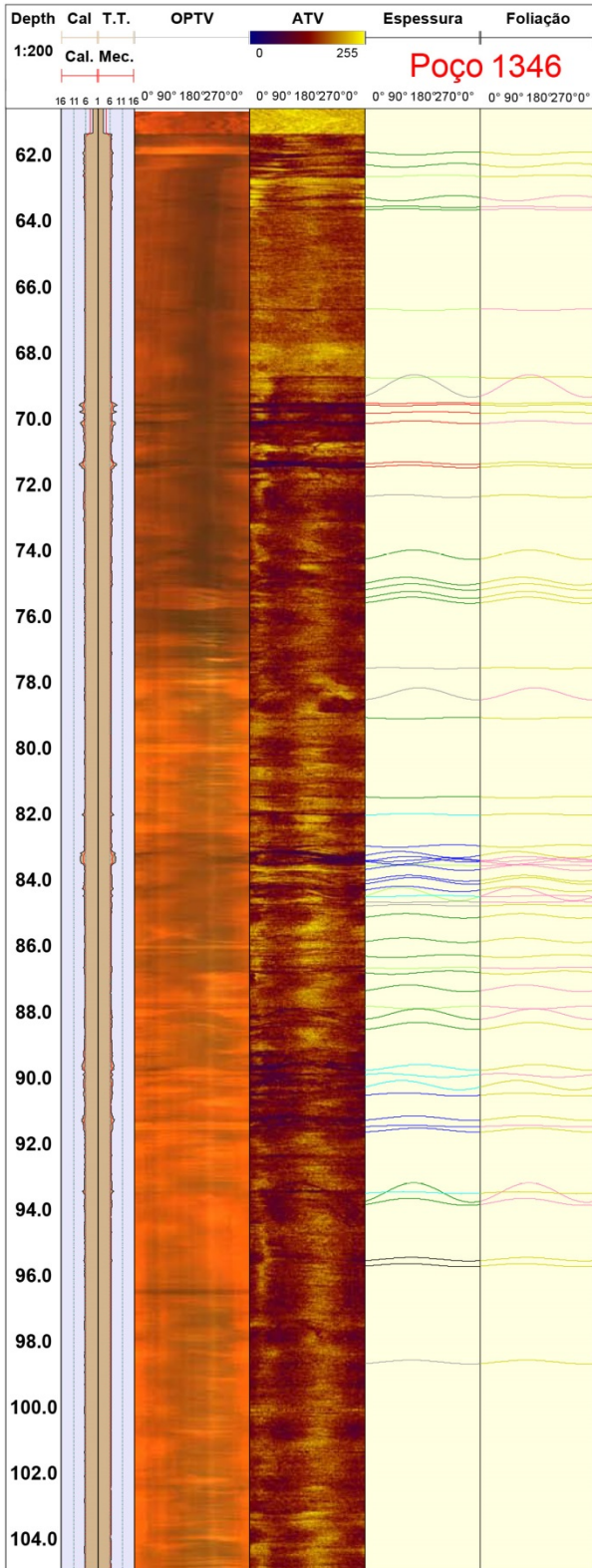


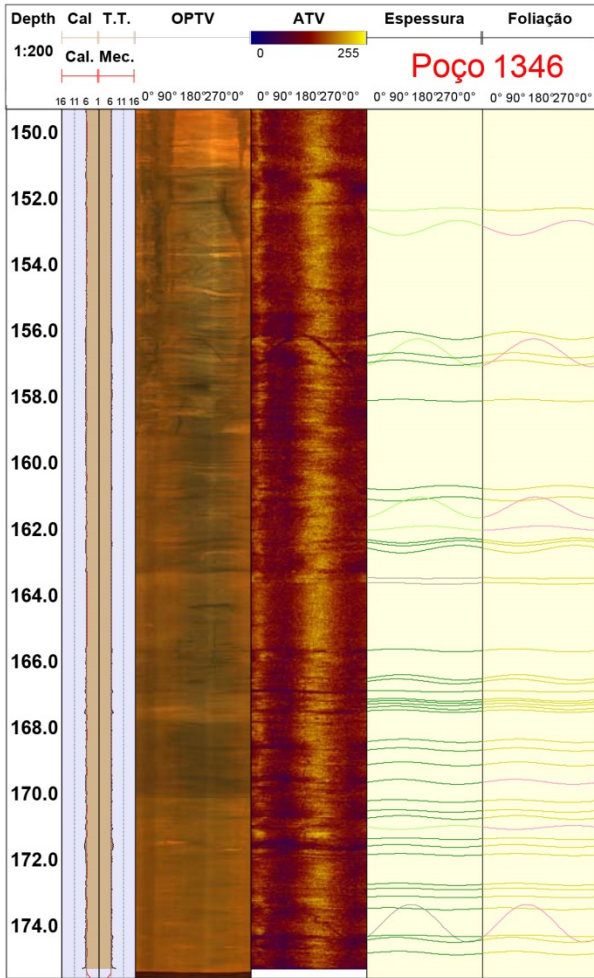




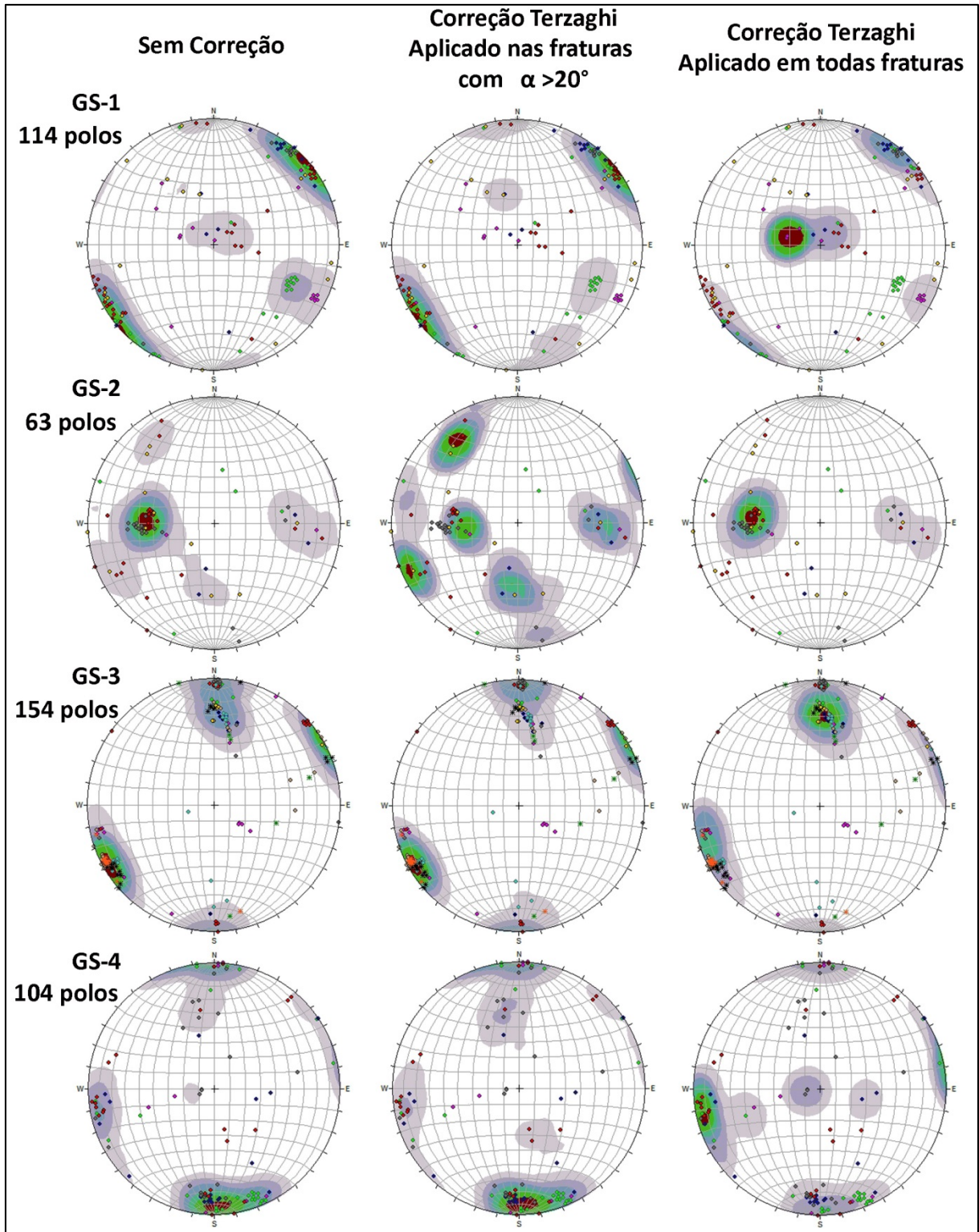


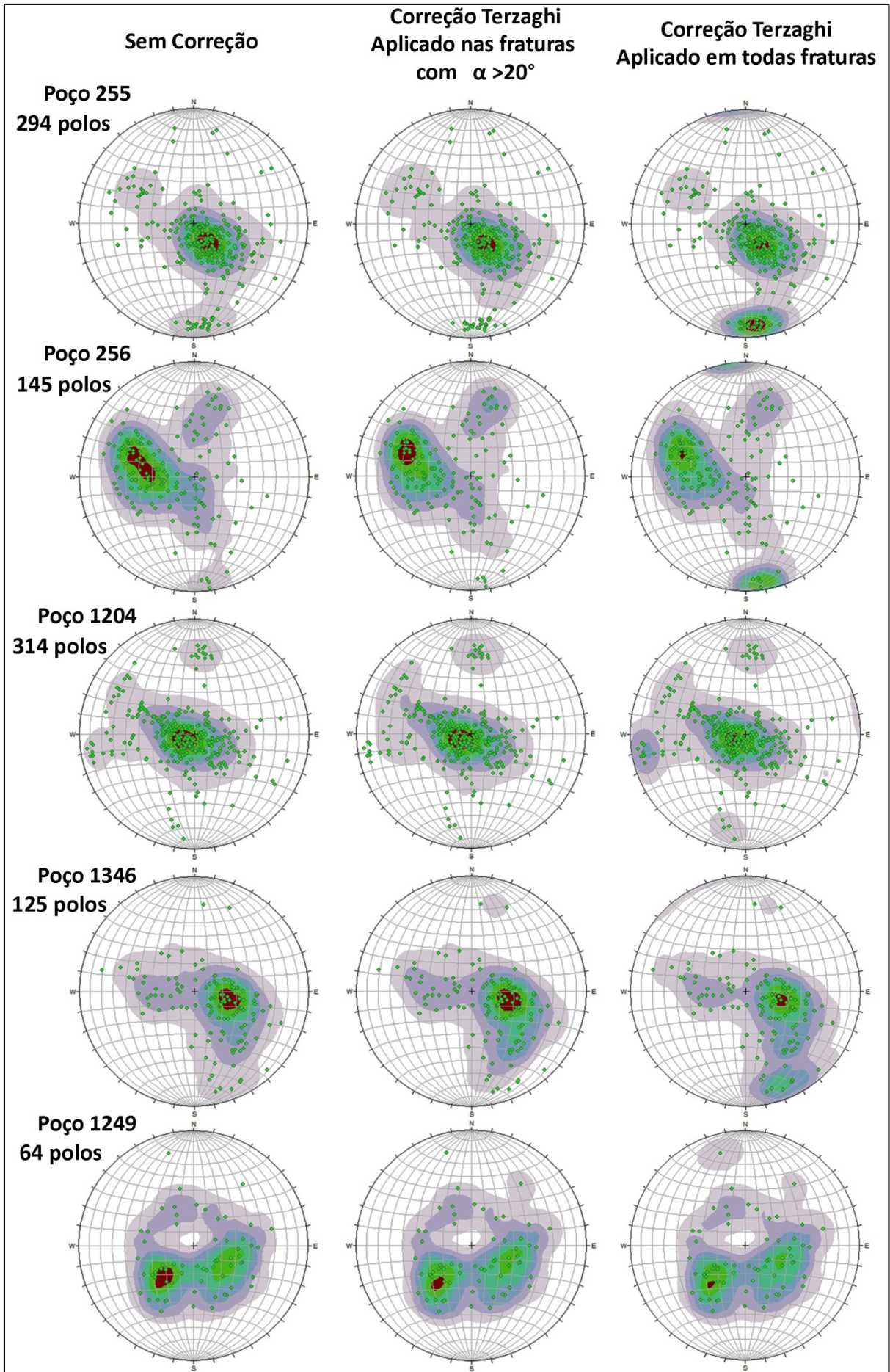


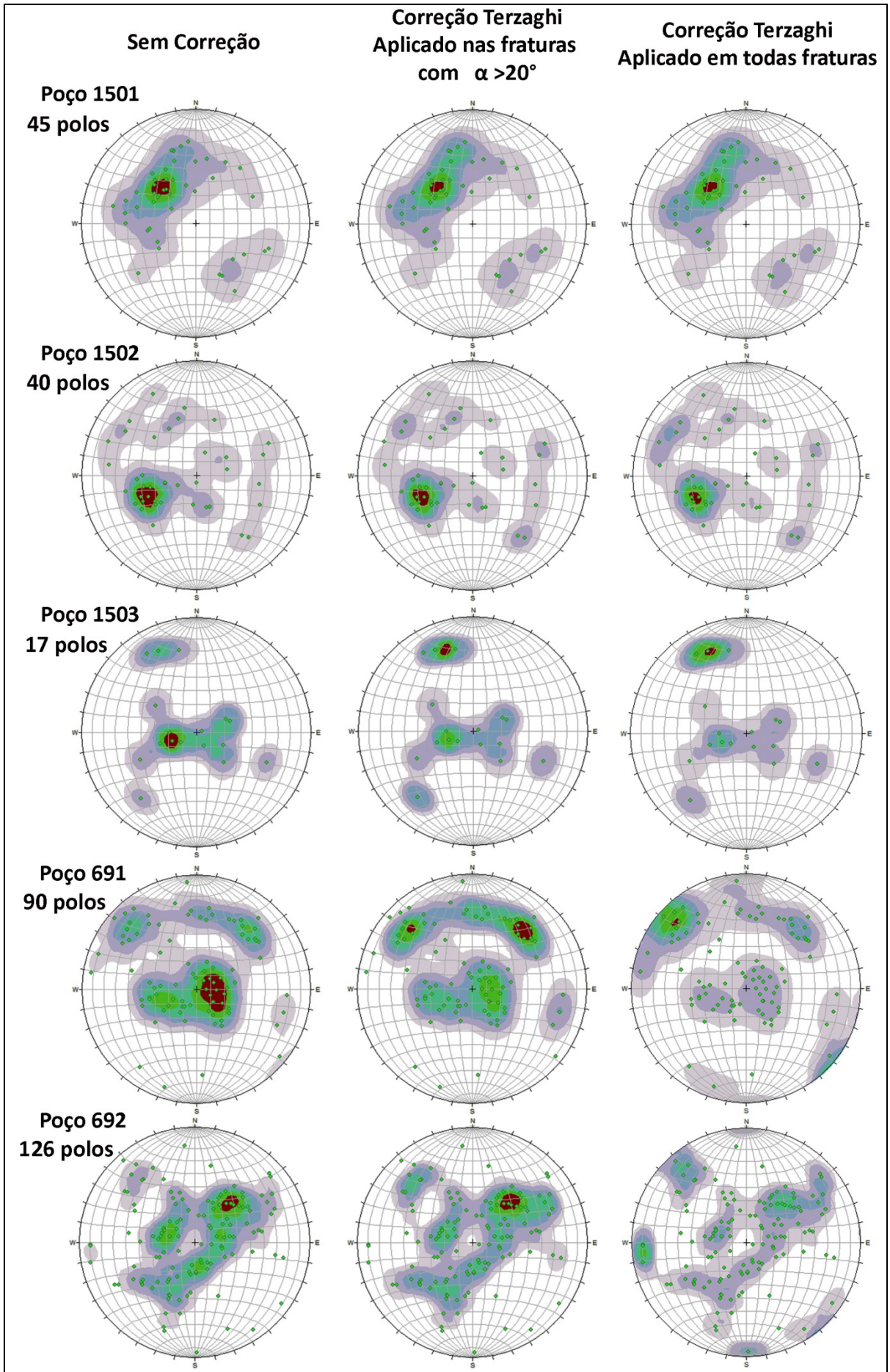




ANEXO 3







Cálculos realizados no Excel para obter os ângulos θ de acordo com a Lei dos Cossenos e também o fator de correção de Terzaghi

Direção Polo Fratura (μ)	Caimento do Polo Fratura (ϑ)	p	q	r	Direção do Polo Scanline (μ')	Caimento do Polo Scanline (ϑ')	p'	q'	r'	cos θ	θ	α	1/sen α	N90
A1	B1	$C1 = \cos(A1) * \cos(B1)$	$D1 = \sin(A1) * \cos(B1)$	$E1 = \sin(B1)$	F1	G1	$H1 = \cos(F1) * \cos(G1)$	$I1 = \sin(F1) * \cos(G1)$	$J1 = \sin(G1)$	$K1 = (C1 * H1) + (D1 * I1) + (E1 * J1)$	$L1 = \text{ACOS}(K1)$	$M1 = 90 - L1$	$N1 = 1 / M1$	$O1 = N1 * 10$