

Modelo geométrico de fraturas e análise da tectônica rúptil aplicados ao estudo do fluxo do aquífero cristalino, São Paulo (SP)

Geometric fracture model and brittle tectonic analysis applied to the study of the crystalline aquifer flow, São Paulo (SP)

Amélia João Fernandes¹, Bruna Fiume², Reginaldo Bertolo³ e Ricardo Cesar Aoki Hirata³

¹Instituto Geológico – SMA, Rua Joaquim Távora, 822, CP 972, CEP 01065-970, São Paulo, SP, Brasil
(amelia.jfernandes@gmail.com)

²Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, Belo Horizonte, MG, Brasil (bruna.fiume@cprm.gov.br)

³Universidade de São Paulo – USP, Instituto de Geociências, São Paulo, SP, Brasil (bertolo@usp.br; rhirata@usp.br)

Recebido em 14 de agosto de 2015; aceito em 10 de maio de 2016

Resumo

A análise detalhada de estruturas rúpteis é uma ferramenta ainda pouco utilizada no estudo de aquíferos fraturados, apesar de ser complementar aos dados obtidos em poços e de fornecer elementos de grande relevância para a elaboração de modelos conceituais de fluxo de água subterrânea. Este trabalho apresenta análise de dados coletados em pedreiras do Complexo Embu, visando elaborar modelo geométrico de fraturas em granitos e gnaisses pré-cambrianos, de modo a fornecer subsídios a projeto mais amplo de caracterização de contaminação de aquíferos por solventes organoclorados da área industrial do Jurubatuba, na cidade de São Paulo. Os dados coletados ao longo de *scanlines*, com correção do viés de orientação, e em observações pontuais, permitiram caracterizar grupos de fraturas, bem como seus respectivos campos de esforços e idades relativas. Os grupos subverticais de expressão regional são extrapoláveis para a área do Jurubatuba, complementando os dados obtidos em perfisagens de poços verticais. A transmissividade relativa dos grupos de fraturas é indicada pelo seu grau de intemperismo, presença de vegetação e de saídas de água. A pedreira constituída de gnaisses é o melhor análogo da geologia da área industrial. Sua foliação, afetada por dobra cilíndrica aberta e assimétrica, é de baixo a médio mergulho para SE ou NW e foi intensamente reativada como fraturas contínuas e de baixo mergulho, cuja transmissividade é relativamente elevada. Abundantes fraturas NW subverticais podem ser o principal caminho para o fluxo vertical. Fraturas subverticais NE são transmissivas, no entanto apresentam grande espaçamento e, por isso, são consideradas de menor importância para o fluxo, da mesma forma que as frequentes fraturas subverticais EW, de menor transmissividade relativa.

Palavras-chave: Fraturas; Aquífero cristalino; Geologia estrutural; Tectônica rúptil; São Paulo; Brasil.

Abstract

Detailed structural analysis is still incipiently applied to fractured aquifers, although it provides relevant data for the elaboration of more realistic groundwater flow conceptual models and is complementary to hydraulic data obtained from boreholes. This article presents an analysis of data collected in quarries of the Embu Complex aiming at elaborating a geometrical fracture model for Precambrian granites and gneisses, in order to provide a basis for characterizing the aquifer contamination by chlorinated solvents in the Jurubatuba urban and industrial area, located in the São Paulo municipality. The data collected along *scanlines*, to which an orientation bias correction was applied, and in isolated spots, permitted to characterize fractures sets, as well as their respective stress fields and age relationships. The main subvertical sets that occur in the quarries are likely to be present also in the Jurubatuba area, and complement the fracture data obtained through vertical well profiling. The relative transmissivity of the fracture sets is indicated by the weathering intensity, as well as presence of vegetation and water seepage. The quarry constituted by gneiss is the best analog of the geology of the industrial area. The gneiss foliation draws an open and asymmetric cylindrical fold and dips in a low angle to SE or NW, being intensively reactivated as continuous low-dip and transmissive fractures. Abundant subvertical NW fractures are probably the main vertical flow path. Subvertical NE fractures are transmissive, however are largely spaced and, as a result, are considered less important for water flow, as are the quite frequent subvertical EW fractures, due to their relatively low transmissivity.

Keywords: Fractures; Crystalline aquifer; Structural geology; Brittle tectonics; São Paulo; Brazil.

INTRODUÇÃO

Esta pesquisa teve como objetivo elaborar um modelo geométrico de fraturas em granitos e gnaisses pré-cambrianos a partir de uma análise detalhada da deformação dútil, de modo a contribuir para a elaboração de modelo conceitual de fluxo em aquífero fraturado da área industrial do canal do Jurubatuba, na cidade de São Paulo. A aplicação desta área da geologia estrutural é de grande relevância para a locação de poços de água subterrânea; para a geologia de engenharia, relacionada a construção de túneis, estradas e barragens; e para estudos de contaminação de aquíferos. Este trabalho, especificamente, insere-se no Projeto Jurubatuba, que visa a investigação de contaminação de água subterrânea por solventes organoclorados na porção sul da cidade de São Paulo. Esta contaminação atinge tanto a cobertura sedimentar como os gnaisses, granitos e xistos do aquífero fraturado subjacente. Neste, a circulação de água subterrânea acontece ao longo de uma rede de fraturas cujas características geométricas (tais como, espaçamento e comprimento) e de hidráulica (transmissividade) são de difícil previsão. Soma-se a isso o fato dos contaminantes dissolvidos terem alcançado profundidades da ordem de várias dezenas de metros, em resposta aos potenciais hidráulicos verticais descendentes, provocados pelo bombeamento do aquífero da região. Assim, este estudo constitui grande desafio e o modelo conceitual elaborado deverá contribuir para o planejamento das demais atividades do projeto, tais como o desenho e emprego de técnicas sofisticadas de monitoramento e de caracterização de fraturas (mapeamento de fraturas hidráulicamente ativas utilizando um *Flute liner*, instalação de portas de monitoramento em sistema multinível), inéditas no país, almejando definir as bases para a gestão do problema da contaminação.

No Brasil, são escassos os trabalhos que aplicaram análise estrutural detalhada ao estudo de aquíferos fraturados, podendo ser mencionados Fernandes e Rudolph (2001) para a região de Campinas (SP), e Alves (2008), sobre contaminação em rochas do Complexo Embu da região de Cotia (SP). Também há exemplos nacionais de estudos de deformação dútil aplicados à elaboração de modelos conceituais de circulação de água subterrânea em rochas vulcânicas (Fernandes et al., 2011; Wahnfried, 2010). A literatura internacional tem demonstrado vínculo entre esforços neotectônicos e orientação dos caminhos preferenciais de circulação de água subterrânea (Barton et al., 1995; Ferrill et al., 1999; Morin e Savage, 2003), sendo que Fernandes e Rudolph (2001) sugeriram, com base em análise estrutural e orientação de lineamentos, que a direção das fraturas mais transmissivas pode variar em distâncias relativamente pequenas, como também demonstrado por Talbot e Sirat (2001). Maloney et al. (2006) concluem que tais variações são causadas pelo fato dos esforços tectônicos (principalmente até 300 m de profundidade) serem controlados por fatores locais.

A análise estrutural deste trabalho teve como base o levantamento sistemático de fraturas em pedreiras localizadas dentro da faixa de ocorrência do Complexo Embu, a uma distância, em linha reta, que varia entre 13 e 24 km para oeste da área contaminada do Jurubatuba (Figura 1), já que neste local boas exposições de rocha são inexistentes, em vista da densa ocupação urbana. Os dados coletados por Fiume (2014) são aqui analisados e parcialmente reinterpretados e complementados. A autora também realizou coleta de dados de fraturas, em poços verticais localizados na área do Jurubatuba, através de perfilagens acústicas (ATV) e ópticas (OTV) e de medida de velocidade de fluxo, através de *flowmeter*. Estes dados permitiram realizar análise estrutural local e medição do fluxo associado a fraturas específicas. O levantamento de fraturas nas pedreiras, aqui apresentado, foi essencial para inferir a ocorrência de fraturas de mergulhos elevados, que são subestimadas nas perfilagens de poços, devido ao fato destes serem verticais; este assunto será tratado de forma mais aprofundada em artigo futuro. Além disso, os poços não possibilitam a observação de feições importantes para a construção do modelo geométrico, tais como comprimentos e interação entre fraturas.

Assim esta pesquisa preenche uma lacuna importante relativa ao conhecimento das características geométricas da rede de fraturas na região de interesse e fornece uma análise preliminar dos caminhos preferenciais de circulação de água subterrânea, essenciais para a elaboração do modelo conceitual de fluxo de água subterrânea. Este foi elaborado com base na identificação: (1) dos grupos de fraturas de expressão regional, cuja ocorrência, portanto, pode ser esperada na área do Jurubatuba; (2) do regime tectônico e campos de esforços em que tais grupos de fraturas foram gerados; (3) da idade relativa entre os grupos, pois estes podem implicar em maior ou menor continuidade das suas fraturas; e (4) da transmissividade relativa entre os grupos de fraturas com base na observação sistemática de feições que indiquem presença de fluxo de maior ou menor intensidade.

MÉTODOS

As pedreiras onde foram coletados os dados inserem-se no mesmo contexto tectônico da área contaminada junto ao canal do Jurubatuba. Todas estão a oeste da Bacia São Paulo, dentro do Complexo Embu, e entre as zonas de cisalhamento de Caucaia, a norte, e de Cubatão, a sul (Figura 1). As quatro pedreiras visitadas foram denominadas pelas siglas GS1, GS2, GS3 e GS4 e estão localizadas nos municípios de Embu das Artes, Itapeverica da Serra e São Paulo; suas grandes dimensões garantem uma amostragem representativa das fraturas de cada local em que estão situadas. A seguir são descritos os métodos de coleta de dados, de correção do viés de orientação e de caracterização dos grupos de fraturas,

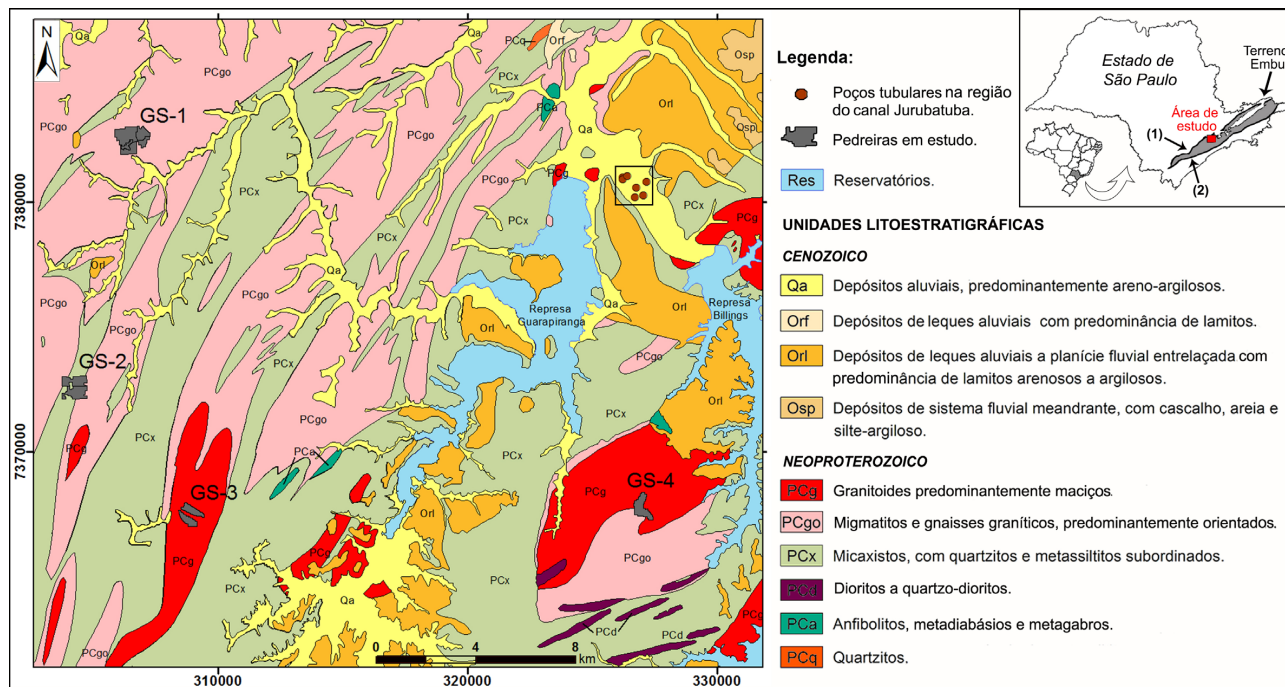


Figura 1. Mapa geológico com localização das pedreiras visitadas e de poços próximos ao canal do Jurubatuba. O mapa geológico é baseado em SABESP/CEPAS-IGc-USP (1994) e o mapa do Estado de São Paulo mostra a área de ocorrência do Terreno Embu, que é delimitado a norte e a sul pelas zonas de cisalhamento de Caucaia (1) e Cubatão (2), respectivamente.

bem como de elaboração do modelo geométrico de fraturas, hierarquizadas em termos de fluxo preferencial.

Coleta de dados em *scanlines* e em pontos isolados

O levantamento de dados estruturais nas pedreiras foi realizado ao longo de *scanlines* (linhas de amostragem ao longo das quais os dados das fraturas foram coletados), em paredes planas, limpas e longas, e em observações pontuais, adequando o método descrito em Rouleau e Gale (1985). As *scanlines* foram distribuídas e orientadas de forma diversificada de modo que o levantamento fosse representativo do afloramento (Priest, 1993).

Para cada *scanline* foi preenchida uma planilha contendo seu comprimento e coordenadas inicial e final. Para cada fratura, foram preenchidos os seguintes campos: posição na *scanline*; fratura simples ou zona de fratura (espessura e número de fraturas); atitude (notação da bússola Clar); direção, caimento de estrias e sentido de movimento; cor e espessura de alteração; preenchimento; morfologia (plana ou ondulada); rugosidade; comprimento; terminação em outra fratura. O campo “observações” foi reservado para: feições indicativas de fluxo (presença de alteração e/ou saídas de água e/ou vegetação); relação com estruturas preexistentes, tais como veios e foliações; padrões de fraturas (em *echelon*, em flor, conjugadas, anastomosado). Dados estruturais relevantes

para a análise tectônica (e.g., *slickensides* e terminações entre os grupos de fraturas), bem como feições indicativas de fluxo de água subterrânea, foram obtidos também em observações pontuais. Croquis foram elaborados de modo a representar de forma clara as terminações entre as fraturas. O registro fotográfico foi obtido de forma sistemática e possibilitou realizar observações posteriores.

Correção de viés de amostragem

O viés de amostragem causado pela orientação relativa entre a linha de amostragem e a atitude média do grupo de fraturas ocorre, principalmente, quando as *scanlines* não possuem orientações suficientemente variadas e, conseqüentemente, a proporção das fraturas de diferentes grupos não é adequadamente representada (Terzaghi, 1965). Por exemplo, sondagens verticais favorecem a visualização de fraturas com baixo ângulo de mergulho e não são representativas para as fraturas de mergulhos elevados.

Terzaghi (1965) propôs um método de correção desse viés que 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 a orientação das fraturas interceptadas (Figura 2). O número de fraturas presentes ao longo de uma sondagem de comprimento L é $N\alpha$, e o corrigido é N_0 ($N_0 = N\alpha * 1/\text{sen}\alpha$), que corresponde ao número de fraturas que seriam

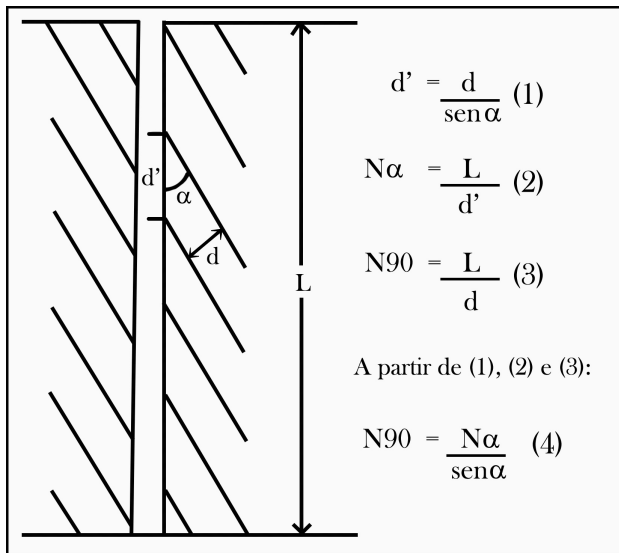


Figura 2. Relação angular entre o espaçamento aparente (d') e o espaçamento verdadeiro (d) de fraturas de um mesmo grupo, e os cálculos envolvidos na correção da densidade de fraturas (modificado de Terzaghi, 1965).

interceptadas, caso a mesma sondagem de comprimento L fosse perpendicular às fraturas. Terzaghi (1965) recomenda desconsiderar fraturas com ângulo α menor que 20° com a linha de amostragem, devido aos grandes erros que podem causar. Os valores $N90$ de cada grupo são plotados em um estereograma, obtendo-se em seguida os contornos corrigidos com relação às densidades relativas dos vários grupos de fraturas, auxiliando na identificação dos principais grupos de fraturas presentes nos afloramentos. Neste trabalho as *scanlines* são linhas horizontais ao longo de afloramentos verticais. Foi utilizada uma adaptação de Pino (2012), que possibilita o uso de *softwares* para plotagem das densidades corrigidas em estereogramas.

Um cálculo da densidade, para fraturas cujo α é maior do que 20° , foi obtido, para cada *scanline*, pela soma dos valores de $N90$ verdadeiro (não multiplicado por 10), para todas as fraturas de um mesmo grupo, e divisão do resultado pelo comprimento da linha de observação; o espaçamento corresponde ao valor inverso da densidade.

Caracterização dos principais grupos de fraturas e elaboração de modelo geométrico

Os grupos de fraturas (conjunto de fraturas de atitude semelhante que, em geral, distribuem-se de forma concentrada no estereograma) foram identificados através da plotagem dos pólos ou de círculos máximos das fraturas, utilizando o *softwares* DIPS v.5.1. e OpenStereo v.0.1.2. Modos de propagação de fraturas neoformadas (cisalhamento, extensão ou ambos) foram deduzidos através de relações

angulares, em que fraturas conjugadas de cisalhamento e híbridas (estas propagadas simultaneamente por extensão e por cisalhamento) apresentam ângulo 2θ ao redor de 60° ou menor que 45° entre si, respectivamente (Price e Cosgrove, 1990); fraturas neoformadas propagadas apenas por extensão constituem um grupo de fraturas paralelas ao esforço máximo principal (σ_1) e podem apresentar “plumas” em suas superfícies. Os modos de propagação, bem como indicadores do sentido do cisalhamento (estrias e feições associadas), permitiram determinar o campo de esforços que gerou cada grupo de fraturas. A idade relativa entre os grupos foi estabelecida com base nas interações entre fraturas, as mais jovens terminam nas mais antigas e tendem a ser mais curtas (Price e Cosgrove, 1990, p. 49-51). Conseqüentemente, as idades relativas dos campos de esforços, associados a grupos de fraturas específicos, também são estabelecidos. Os dados de espaçamento, comprimento, ocorrência de zonas de fraturas, interação entre grupos de fraturas, bem como a indicação de maior ou menor fluxo de água subterrânea, foram utilizados na elaboração do modelo geométrico.

CONTEXTO GEOLÓGICO

Na área contaminada do Jurubatuba e adjacências afloram depósitos aluviais da planície do Canal do Jurubatuba (Quaternário), lamitos arenosos e argilosos de ambiente fluvial da Formação Resende (Oligoceno) e, gnaisses, mica-xistos e granitos maciços do Complexo Embu (Pré-Cambriano) (Figura 1). As pedreiras visitadas são constituídas por gnaisses granitoides (GS1 e GS2) e granitos maciços (GS3 e GS4) do Terreno Embu (Figura 1). Na GS1, o gnaisse é leucocrático, equigranular e relativamente homogêneo, com exceção de algumas porções, de espessura decimétrica, contendo bandas quartzo-feldspáticas e/ou bandas xistosas, ricas em biotita. Veios quartzo-feldspáticos, de granulação média ou grossa, de espessura centimétrica, ocasionalmente de alguns decímetros, e coloração rósea, são comuns, podendo ser paralelos ou oblíquos à foliação. Nas porções de gnaisse homogêneo, a foliação é plano-linear. Na pedreira GS2, o gnaisse é muito homogêneo e de composição granitoide, leucocrático, inequigranular médio, com megacrístais esparsos (1 a 2 cm) de feldspato branco e frequentes veios, em geral paralelos à foliação, centimétricos, quartzo-feldspáticos, brancos. Nas pedreiras GS3 e GS4 ocorre granito cinza claro, leucocrático, equigranular médio, com enclaves leucocráticos a mesocráticos, centimétricos a decimétricos, de cor cinza médio a escuro, além de ocasionais veios quartzo-feldspáticos, centimétricos, brancos e de granulação grossa.

As zonas de cisalhamento Taxaquara e Caucaia-Rio Jaguari são as estruturas mais marcantes da região e delimitam o Terreno Embu a norte e a sul, respectivamente, com idades de 605 a 520 Ma (Heilbron et al., 2004). A deformação rúptil mais importante data do Paleógeno e corresponde

às falhas que fazem parte do Sistema de Riftes da Serra do Mar (Almeida, 1976), renomeado como Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) (Riccomini, 1989), ao qual a deposição da Bacia São Paulo está associada. As antigas zonas de cisalhamento foram reativadas durante o Paleógeno (Riccomini, 1989), resultando num hemigráben de direção ENE, basculado para NNW, com borda norte retilínea e controlada pelas zonas de cisalhamento Taxaquara-Jaguari, e borda sul irregular, onde as unidades da Bacia repousam sobre rochas do Terreno Embu (Riccomini e Coimbra, 1992). Após a formação das bacias do RCSB, eventos tectônicos, do Neógeno ao Holoceno, deformaram as suas unidades sedimentares (Riccomini et al., 2004).

RESULTADOS

Caracterização dos grupos de fraturas

Os grupos de fraturas identificados, contrastantes para as pedreiras GS-1 e GS-2 (Figuras 3 e 4) e semelhantes para as pedreiras GS-3 e GS-4 (Figuras 5 e 6), foram numerados de acordo com a sua abundância relativa. O **grupo 1**, o mais frequente na GS-1 e GS3, apresenta direções N5-65W e mergulho subvertical (Tabela 1). Forma conspícuas zonas de fraturas (Figura 7 e 8), que, na GS3, concentram-se no intervalo N30-40W e alojam diques (Figura 8) de espessura centimétrica a até 40 cm. A composição mineralógica original

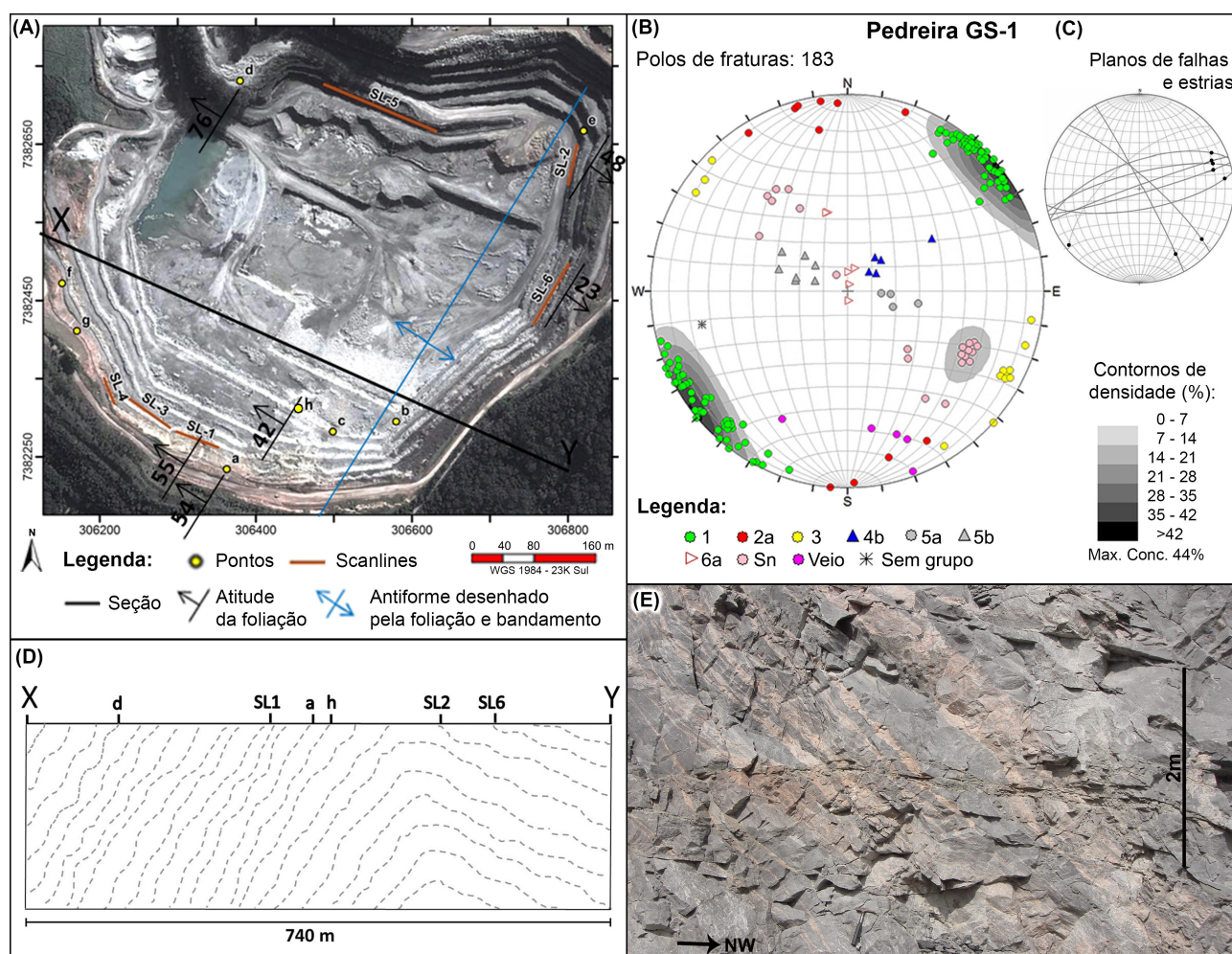


Figura 3. (A) Planta da pedreira GS1 com localização de *scanlines* (SL) e pontos onde os dados estruturais foram levantados. (B) Cada grupo de fratura é representado por uma cor no estereograma de projeção polar, cujos contornos de densidade foram corrigidos com relação ao viés de amostragem. “Sn” refere-se a fraturas paralelas à foliação (21 medidas), e “Veio” refere-se a fraturas paralelas a veios (5 medidas). (C) Estereograma de grandes círculos representa falhas com suas estrias (pontos nos grandes círculos). (D) Seção XY, representada em (A), mostrando o antifórme desenhado pela foliação e bandamento. (E) Bandamento gnáissico observado no ponto c. Em (B) e (C), os dados foram projetados no Hemisfério Inferior, sobre o diagrama de Igual Área.

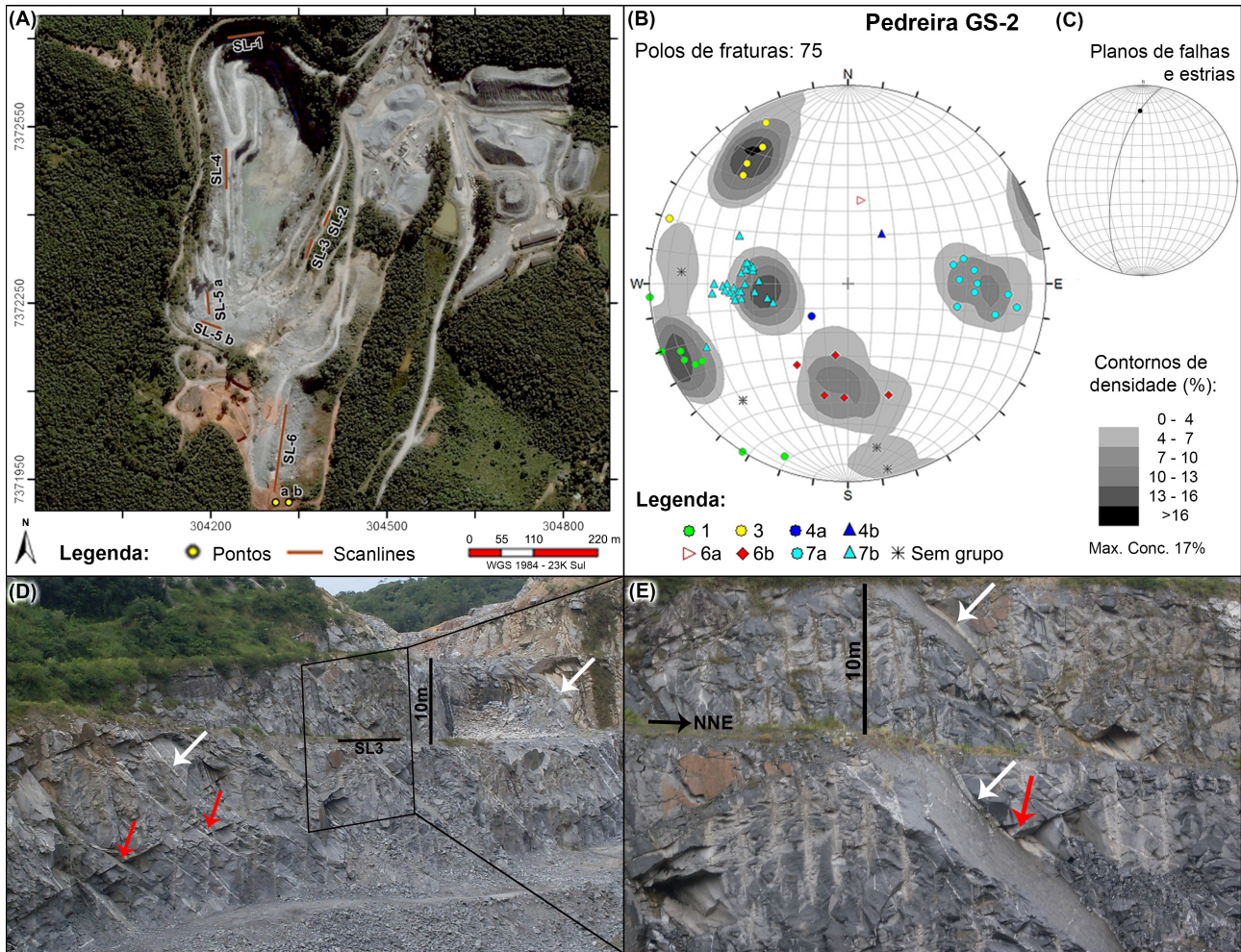


Figura 4. (A) Planta da pedreira GS2 com localização de *scanlines* (SL) e pontos onde os dados estruturais foram levantados. (B) e (C) estereogramas representando todas as fraturas (e contornos corrigidos com relação ao viés de amostragem) e as falhas com suas estrias, respectivamente. (D) e (E) parede da SL3, mostrando fraturas do grupo 6b que terminam nas fraturas mais contínuas do grupo 6a (flechas vermelhas); as fraturas 6a são paralelas aos veios (flechas brancas). Em (B) e (C), os dados foram projetados no Hemisfério Inferior, sobre o diagrama de Igual Área.

é desconhecida, e a intensa alteração, que produziu apenas argilominerais, indica origem diversa da do granito.

Existe um grande número de fraturas de direção geral E-W (GS3 e GS4) (Figura 9), podendo variar para N60-75E (GS1 e GS4), que, por apresentar intervalos de mergulhos distintos, foi subdividido nos grupos: **2a** com mergulho subvertical (80° a 90°) para sul (GS3 e GS4) ou norte (GS3); **2b** com mergulho entre 75 e 65 para sul; **2c** com mergulho entre 80 e 65 para norte; **2d** com mergulho entre 65 e 45 para sul. As fraturas N60-75E com mergulho de 60 a 90°, na GS1, são em parte subparalelas a veios. Por este motivo, a análise da orientação dos esforços e do regime tectônico das fraturas EW é feita apenas com base nos dados da GS3 e GS4, onde não são condicionadas por descontinuidades anteriores.

O **grupo 3** ocorre de forma isolada e é composto por fraturas com direção NE e mergulho entre 60 e 90° para NW ou SE, e é melhor representado na GS-3, apesar de ter sido identificado apenas localmente (Figura 10).

A foliação NE dobrada do gnaiss da GS1 (Figura 3) foi reativada durante a deformação rúptil, junto com os veios de atitudes variadas. Isto explica a diversidade de mergulhos das fraturas NE, em parte relacionáveis ao **grupo 3**. A foliação no GS1, com direção predominante N30-40E, desenha um antiforme de dobra cilíndrica assimétrica, com eixo N30-40E sub-horizontal (Figura 3); o flanco leste apresenta mergulhos de 28 a 48° para SE, e o flanco a oeste, 35 a 76° para NW. Fraturas NE paralelas a veios félsicos de atitude N70-80E/65-90NW são comuns.

Fraturas com mergulho inferior ou ao redor de 30° ocorrem em menor quantidade que as subverticais, em parte porque

Tabela 1. Síntese da descrição das características geométricas dos grupos de fraturas.

Grupo	Direção	Mergulho	Espaçamento entre fraturas (*) e dentro de zona de fratura (**); Morfologia; Comprimento; [sigla da pedraira] e número de fraturas por pedraira
1	N15-65W (GS1) N5-60W (GS2) N10-55W (GS3) N5-50W (GS4)	70-90 para NE ou SW	Espaçamento: *2,4 a 13,8 m, **0,07 a 0,54 m (11 zonas) Morfologia: planas a muito planas Comprimento: pelo menos 60-70 m (GS1, GS3), pelo menos métricas (GS2, GS4) [GS1] 110, [GS2] 8, [GS3] 141, [GS4] 22
2a	N60-90E (GS1) N75-85W (GS3) N85E-N80W e N60-75E (GS4)	80-90 para N ou S	Espaçamento: *2,4 a 31,6 m, **0,19 a 0,80 m (5 zonas) Morfologia: planas (Figura 9A e B). Comprimento: métrico a decamétrico [GS1] 11, [GS3] 36, [GS4] 47
2b	EW-N75W (GS3)	80-65/Norte	*1,7 a 16,9 m, **0,20 m (2 zonas) Morfologia: planas Comprimento: métrico a decamétrico [GS3] 26
2c	N75-85E (GS3,GS4)	75-65/Sul	Espaçamento: *2,4 a 31,6 m, **0,19 a 0,80 m (5 zonas) Morfologia: planas (Figura 9A e B). Comprimento: métrico a decamétrico [GS3] 4, [GS4] 14
2d	N75-85W (GS3) N60-80E (GS4)	65-45/Sul	*3,7 a 37 m, não formam zonas de fraturas Morfologia: planas a suavemente curvas Comprimento: métrico a decamétrico [GS3] 40, [GS4] 8
3	N10-40E (GS1) N20-45E (GS3) N60E (GS4)	NW ou SE >75 (GS3) > 60° (GS2)	Espaçamento: * > 28 m medido apenas na GS3; ocorrem isoladamente Morfologia: suavemente onduladas a onduladas Comprimento: métrico a decamétrico Na GS1 são comumente paralelas à foliação [GS1] 13, [GS2] 5, [GS3] 20, [GS4] 3
4a	N0-35W (GS3,GS4)	10-35/NE	Espaçamento: ocorrem de forma ocasional, por vezes sob a forma de zona de fraturas com espaçamento centimétrico a métrico
4b	N15-60W (GS1,GS3,GS4)	10-25/SW	Morfologia: planas a onduladas Comprimento mínimo varia de 3 a 12 m [GS1] 5, [GS2] 1, [GS3] 12, [GS4] 7
5a	N10-40E (GS1,GS3,GS4)	15-35NW	Morfologia: onduladas em zonas ocasionais com espaçamento decimétrico Comprimento mínimo de 2 a 5m [GS1] 4, [GS3] 5, [GS4] 3
5b	N15-45E (GS1)	15-35/SE	Espaçamento: zonas de fraturas com espaçamento decimétrico, contendo algumas faixas com espaçamento centimétrico Comprimento: > 50 m, quando subparalelas à foliação [GS1] 7, [GS3] 5, [GS4] 3
6a	N75-80W (GS1) N60E-N85W (GS4)	~35/Sul	*3,7 a 37 m, não formam zonas de fraturas Morfologia: planas a suavemente curvas Comprimento: métrico a decamétrico [GS1] 6, [GS2] 1, [GS3] 1, [GS4] 12
6b	N80-90W (GS2) N75-80E (GS4)	30-50/Norte	*8,8 a 34,5 m, **decimétrico (GS2 e GS4) [GS2] 5, [GS3] 3, [GS4] 2
7a	N0-15W(GS2)	30-60E	Comprimento métrico a decamétrico 7a [GS2] 10
7b	NS (GS2)	45-75W	Comprimento métrico a decamétrico 7b [GS2] 31

as *scanlines* são horizontais e, portanto, não favorecem a sua medição. Observa-se dispersão mais acentuada destas fraturas na GS1, e isto é atribuído ao fato de parte destas fraturas terem se propagado paralelamente à foliação dobrada do gnaiss (Figura 3) e, mais subordinadamente,

aos veios. Foi possível identificar a existência dos seguintes grupos: **grupos 4a e 4b**, nas pedreiras GS2, GS3 e GS4, com direções no intervalo N35W-NS e mergulhos de 10 a 30° para NE (4a), ou 20 a 25° para SW (4b); **grupos 5a e 5b**, nas pedreiras GS1, GS3 e GS4, de direções

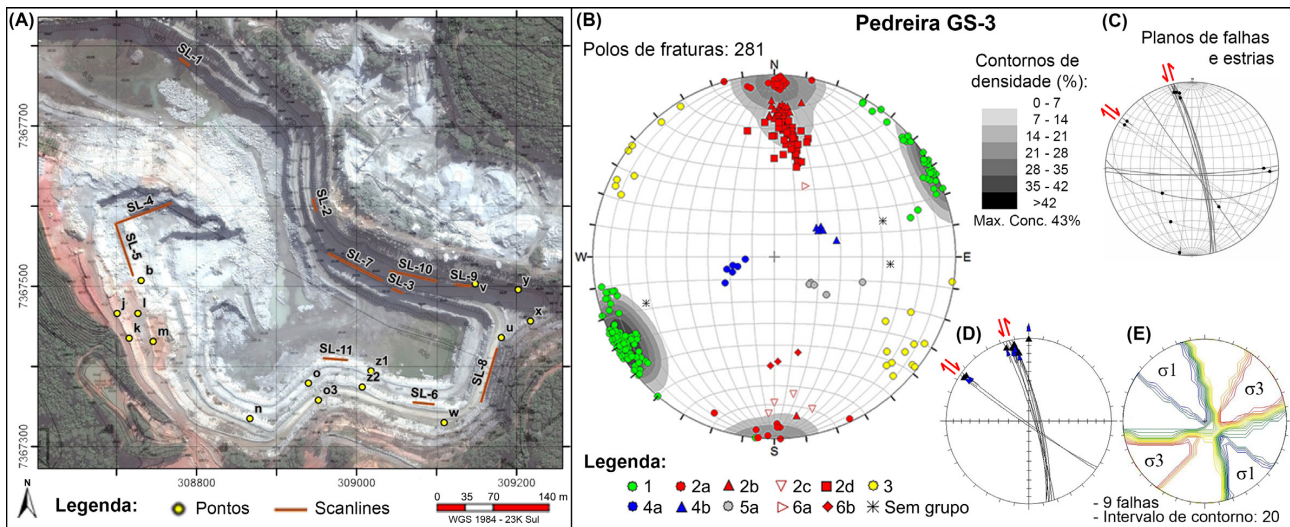


Figura 5. (A) Planta da pedreira GS3 com localização de *scanlines* (SL) e pontos onde os dados estruturais foram levantados. (B) Cada grupo de fratura é representado por uma cor no estereograma de projeção polar, cujos contornos de densidade foram corrigidos com relação ao viés de amostragem. (C) O estereograma de grandes círculos representa falhas com suas estrias e sentidos de movimento. (D) Falhas transcorrentes do grupo 1 com indicação de movimento. (E) Diagrama dos diedros retos (método de Angelier e Mechler, 1977) com a orientação dos esforços σ_1 e σ_3 obtidos através do Stereo32 para as falhas plotadas em (D). Em (B) e (C), os dados foram projetados no Hemisfério Inferior, sobre o diagrama de Igual Área.

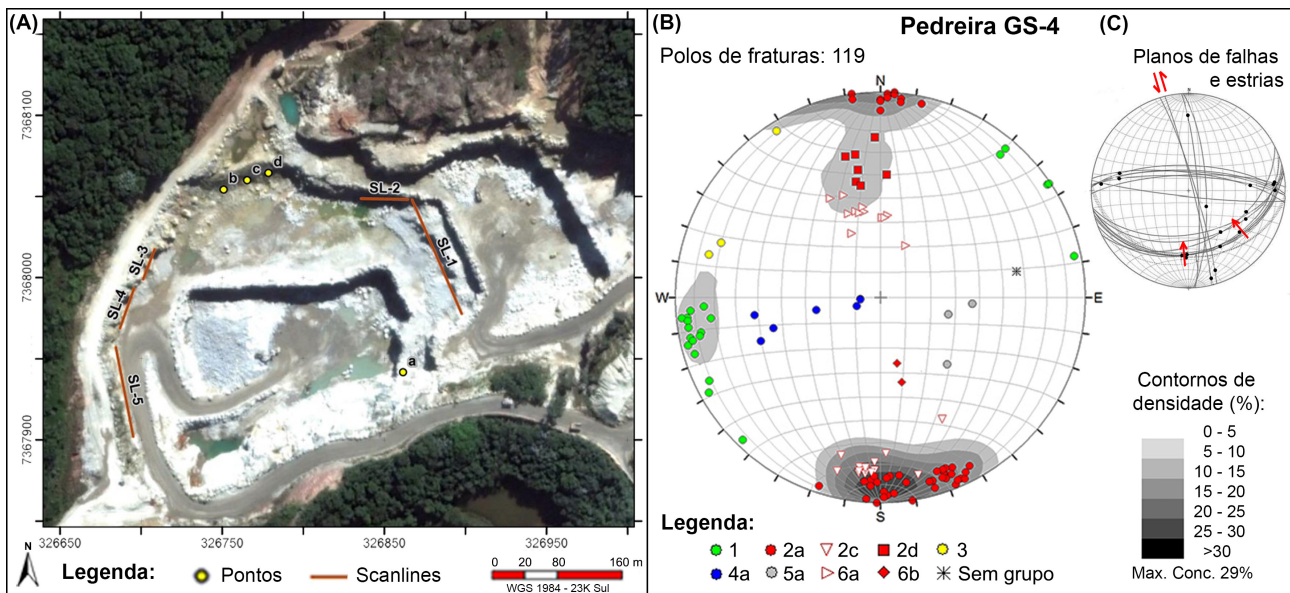


Figura 6. (A) Planta da pedreira GS4 com localização de *scanlines* (SL) e pontos onde os dados estruturais foram levantados. (B) Cada grupo de fratura é representado por uma cor no estereograma de projeção polar, cujos contornos de densidade foram corrigidos com relação ao viés de amostragem. (C) O estereograma de grandes círculos representa falhas com suas estrias e sentidos de movimento. Em (B) e (C), os dados foram projetados no Hemisfério Inferior, sobre o diagrama de Igual Área.

predominantemente no intervalo N15E-N45E e mergulhos entre 20 e 30° para NW (5a) ou 15 a 35° para SE (5b); **grupos 6a e 6b**, de direção aproximada EW (N65E a N80W), com mergulho ao redor de 25 a 40° para sul (6a, na GS4) ou de 30 a 50 para norte (6b, na GS2), respectivamente.

Na parede da porção leste da GS1, as fraturas do **grupo 5b** (N15-45E/15-35SE) são subparalelas à foliação e destacam-se pela grande continuidade (Tabela 1, Figura 11); já o **grupo 5a** (N15E-N45E/20-30NW) ocorre muito ocasionalmente, assim como os **grupos 4a e 4b**.

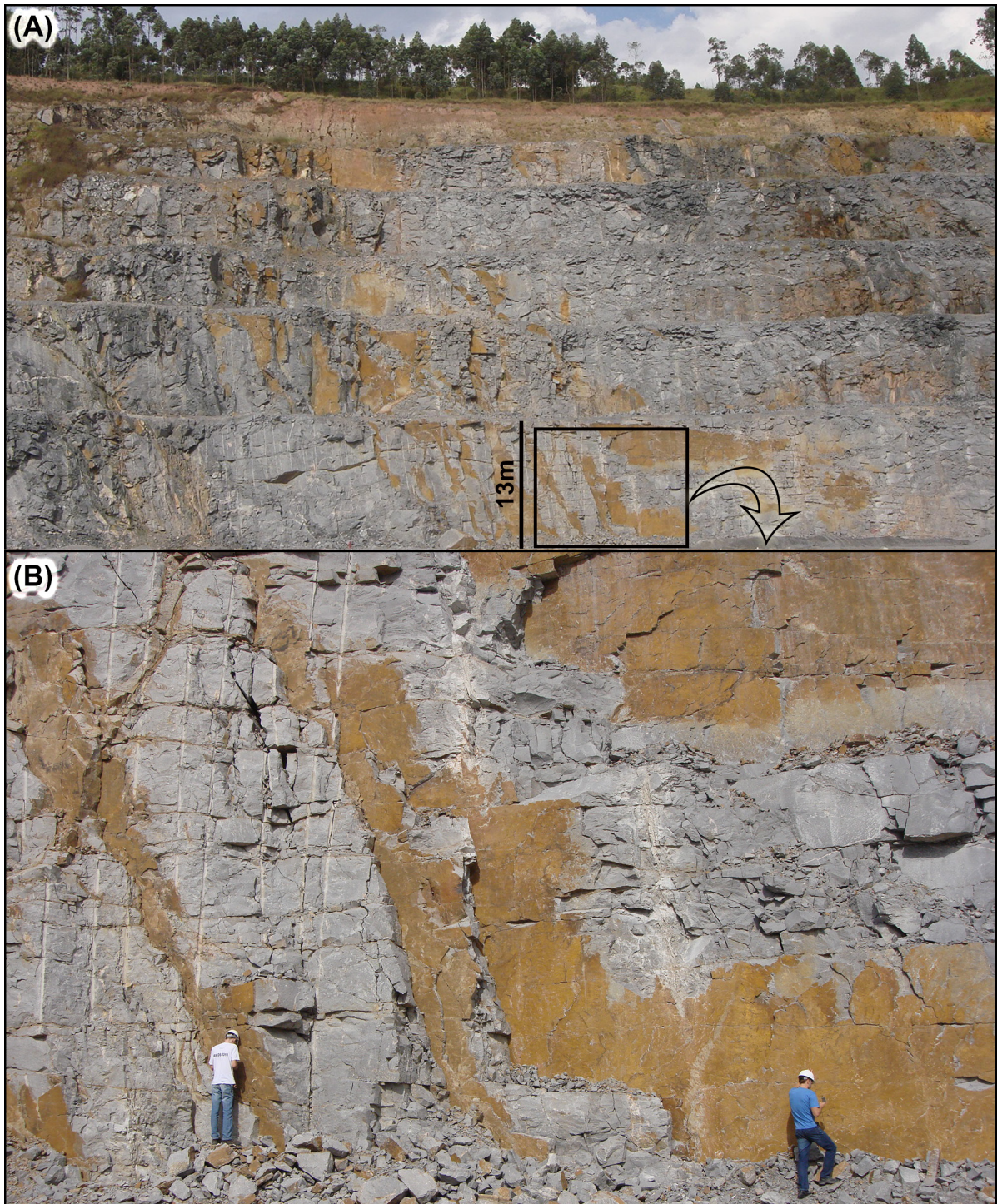


Figura 7. GS1. (A) Conspíquas zonas de fraturas planas do grupo 1 que passam de uma bancada para a outra, seccionando pelo menos seis bancadas e totalizando um comprimento mínimo de cerca de 70 m. (B) Detalhe de (A).

Exclusivos da pedreira GS2, os grupos de fraturas **7a** e **7b** (Figura 4) apresentam direção N-S e ângulo de mergulho predominantemente entre 45° e 55° para oeste (7a) e 40° e 55° para leste (7b). As fraturas do **grupo 7a** são subparalelas às atitudes da foliação do granito-gnaiss desta pedreira e

comumente ocorrem no contato entre veio e rocha (Figura 4). Podem conter estrias, com caimento de 27° e movimento sinistral indicado por degraus no preenchimento de quartzo presente na superfície de falha. Tal movimento é consistente com evento transcorrente que gerou o grupo 1 (σ_1 de direção

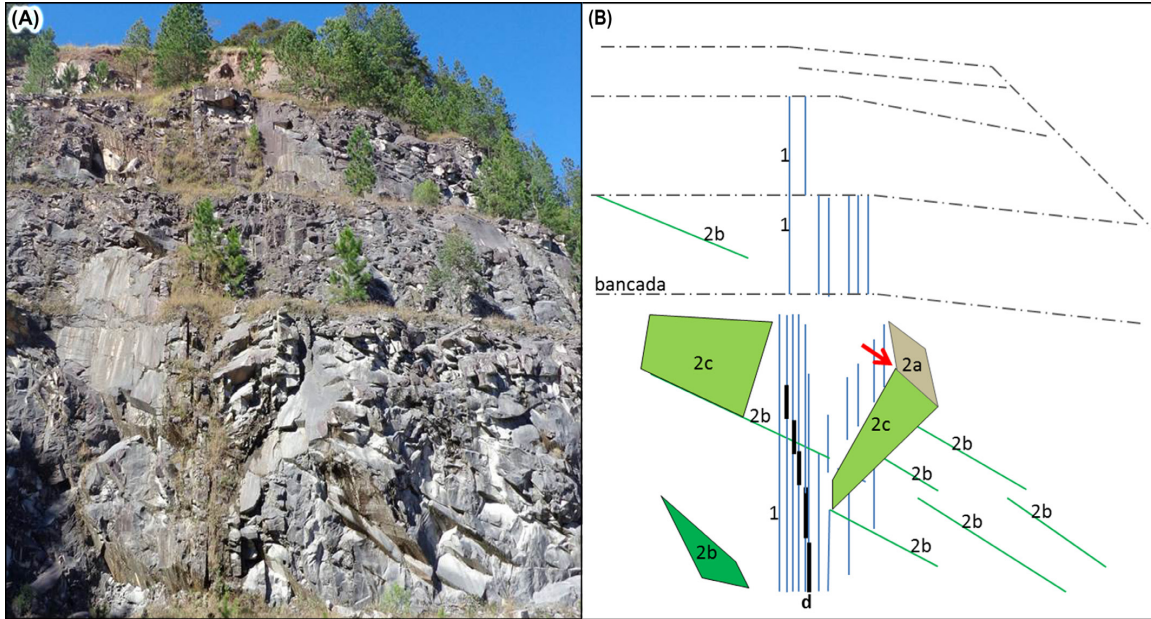


Figura 8. GS-3, ponto x na figura 5. (B) Representação esquemática de (A). Dique máfico em *echelon* (d) de espessura centimétrica foi observado na zona de fraturas contínuas e subverticais do grupo 1 (atitude média 57/88). Grande parte das fraturas desta zona, acompanhadas por alteração e por vegetação, terminam em fratura do grupo 2c (esta é mais antiga) à direita do dique. A fratura 2c, na sua porção superior, passa para fratura do grupo 2a (ponto de inflexão indicado por flecha). As atitudes são dadas pela notação da bússola Clar.

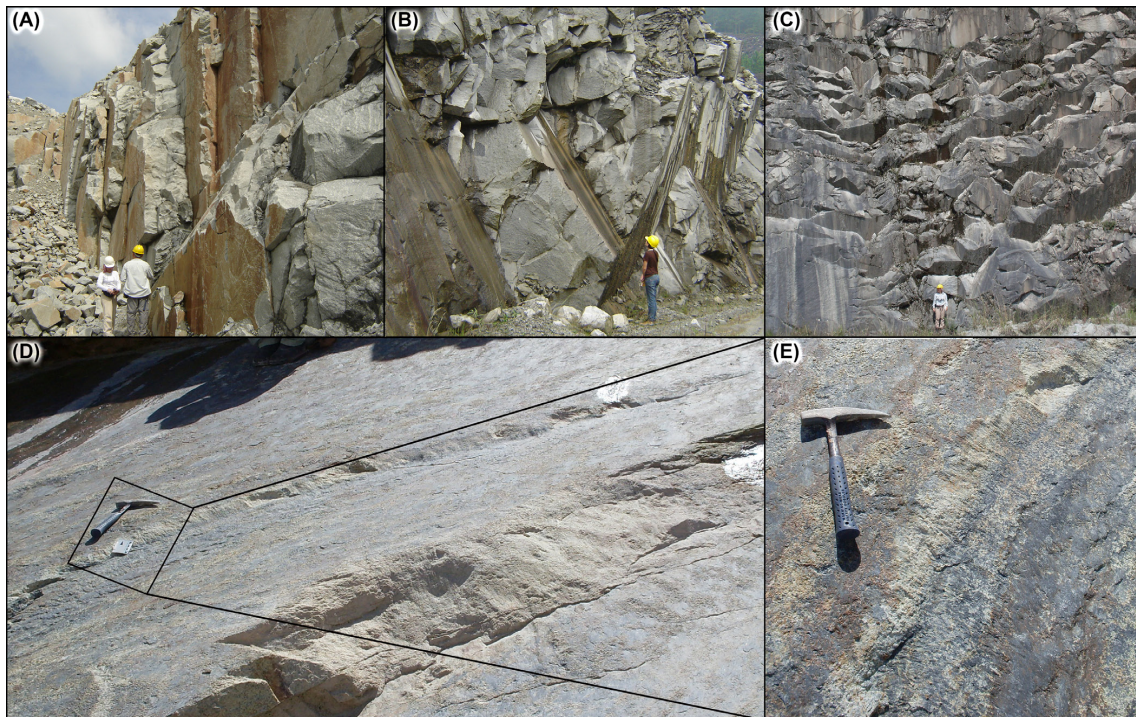


Figura 9. Fraturas de direção geral E-W (GS3 e GS4), podendo variar para N60-75E (GS1 e GS4). (A) Zona de fratura do grupo 2a com mergulho subvertical (80° a 90°) para sul (atitude média 180/86, SL4) e fratura 196/55 do grupo 2d. (B) Grupos 2b com mergulho entre 75 e 65 para sul e 2c com mergulho entre 80 e 65 para norte, indicando regime de falhas normais (atitudes médias 2/75 e 185/60, SL3). (C) Zona de fratura do grupo 2b (atitude média 185/70, ponto W). (D) Fraturas do grupo 6a com mergulho ao redor de 35° para sul (GS4) e estrias no rumo do mergulho. (E) As estrias, nas rampas que conectam as fraturas 6a, indicam movimento de falha inversa. As atitudes são dadas pela notação da bússola Clar.

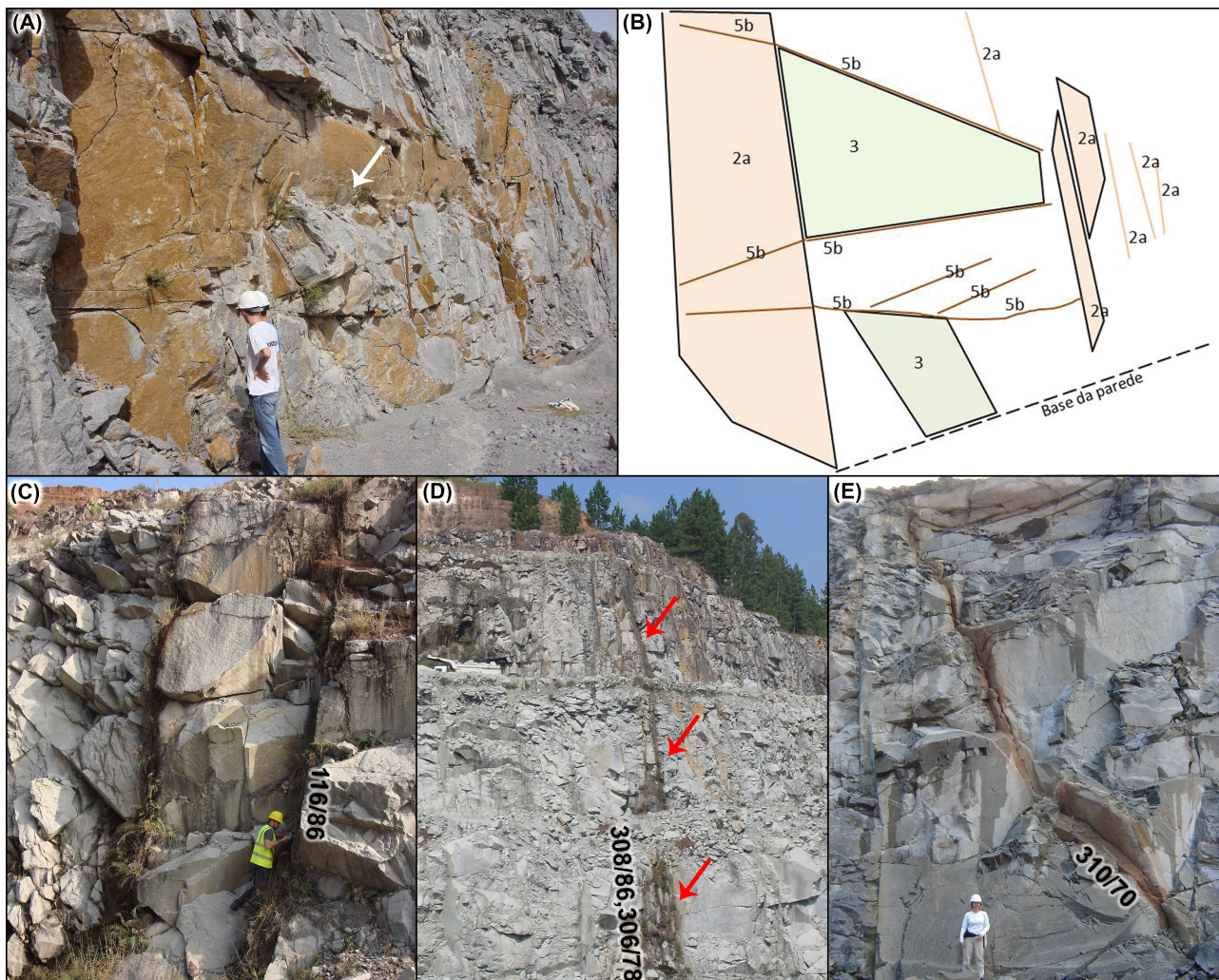


Figura 10. (A) GS1. Fraturas do grupo 3 (312/90), do grupo 2a (358/87) e do grupo 5b (130/23). A fratura do grupo 3, ao se aproximar de fratura do grupo 5b, sofre encurvamento (flecha), indicando que o evento do grupo 5b é mais antigo. (B) Desenho esquemático de (A). (C, D e E) GS3. Todas as fraturas do grupo 3 mostram alteração (cor ocre), que ocorre desde o topo até a base da pedreira (flechas). As atitudes são dadas pela notação da bússola Clar.

NW), As fraturas do **grupo 7b** são perpendiculares ao 7a e frequentemente terminam nestas últimas, indicando que 7b é mais jovem. A ortogonalidade entre estes grupos sugere que a propagação do mais novo foi controlada pelo mais antigo; no entanto, o mecanismo que proporcionou esta relação é desconhecido.

O espaçamento foi calculado para os grupos 1, 2a, 2b, 2c, 2d, 3, 6a e 6b, pois são os que apresentam ao menos duas fraturas em pelo menos uma *scanline horizontal*. Pelo fato das *scanlines* horizontais proporcionarem uma baixa amostragem das fraturas do grupo 5b, seu espaçamento, na pedreira GS-1, foi obtido por contagem ao longo de 15 linhas verticais observadas em fotos próximas ao ponto b (Figuras 3A e 11C) e às *scanlines* SL-2 e SL-6. Trata-se de espaçamento aparente, mas relativamente próximo do real, já que o mergulho das fraturas é baixo (em torno de 20°).

Considerando todos os grupos de fraturas, os valores de espaçamento variam de 1,7 a 37,0 m (Tabela 1) e ajustam-se a uma distribuição logarítmica (Figura 11A) e a mediana e os quartis (25% e 75%), mais representativos para esse tipo de distribuição, são, respectivamente, 8,8, 4,7 e 15,3 m. Já os espaçamentos das fraturas do grupo 5b apresentam distribuição linear (Figura 11B), com média de 2 m. Tomando como referência os valores da mediana e dos quartis, bem como a quantidade de *scanlines* em que cada grupo teve seu espaçamento calculado, conclui-se que os grupos em ordem crescente de densidade são: NE/vertical (grupo 3), E-W/baixo a médio para norte (grupo 6b), E-W/médio a baixo para sul (grupos 2d e 6a), E-W/médio a elevado para sul (grupos 2b e 2d), E-W/vertical (grupo 2) e NW/vertical (grupo 3). O grupo 1 é o que apresenta a maior quantidade de zonas de fraturas e, dentro destas, os menores espaçamentos.

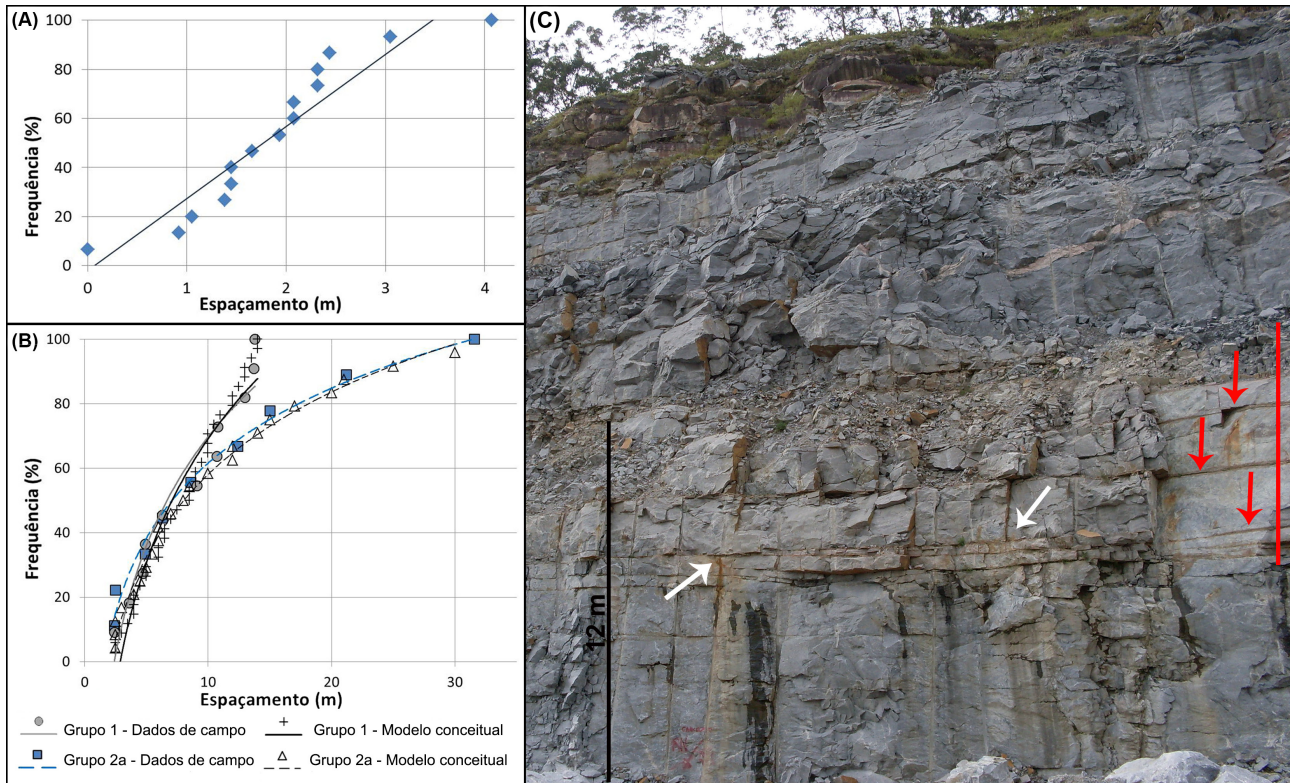


Figura 11. (A) Frequência acumulada dos valores de espaçamento (m), com distribuição linear (média de 2 m) para as fraturas do grupo 5b da GS-1. (B) Comparação entre as frequências acumuladas dos valores de espaçamento obtidos em campo (distribuição logarítmica) e utilizados no modelo geométrico para as fraturas dos grupos 1 e 2a. (C) No ponto b da GS-1 destacam-se fraturas do grupo 5b, com alteração evidente (cor ocre, flechas verticais) na porção central da foto, e fraturas do grupo 1, terminando nas fraturas do grupo 5b (flechas inclinadas). Maior alteração ao longo de fraturas do grupo 5b concentra-se na parte central da foto (barra vertical à direita das flechas verticais).

É seguido pelos grupos 2a, com os espaçamentos um pouco maiores, e 2b+2d, com apenas uma zona com espaçamento interno semelhante ao 2a (Tabela 1).

Análise tectônica

A análise tectônica consistiu em identificar os modos de propagação e os campos de esforços geradores dos principais grupos de fraturas, tendo como base os padrões geométricos de fraturas (ex., fraturas conjugadas ou fraturas paralelas) e feições presentes nas superfícies das fraturas, tais como plumas e estrias. Desta forma, foram identificados os eventos de deformação rúptil, com campos de esforços e regimes tectônicos específicos. A idade relativa entre tais eventos foi estabelecida com base na terminação de fraturas (ver item Métodos), sendo apresentada, de forma sucinta, na Tabela 2. A seguir, os eventos e suas relações de superposição são descritos do mais antigo para o mais jovem.

O evento tectônico gerador dos grupos **5a e 5b** (N10-40E/15°-35° para NW ou SE) é mais importante na GS1, e caracteriza-se por reativar a foliação, sendo, assim, difícil determinar a orientação dos esforços deste evento.

Trata-se do evento mais antigo, sendo que fraturas dos grupos 3 e 1 terminam em fraturas do grupo 5b (Figura 10A e 11C).

O **grupo 3**, de direção NE e com mergulhos predominantemente subverticais (Figura 10), ocorre de forma muito subordinada e não foram observadas feições que permitam indicar qual foi seu modo de propagação, se extensional ou de cisalhamento. Estrias com caimento de 6° em fratura N50E podem ter sido tanto sincrônicas à geração da fratura, neste caso em regime transcorrente, como produto de reativação. Fraturas do grupo 4 são mais jovens, pois terminam nas do grupo 3 nas pedreiras GS1 e GS3.

As fraturas dos **grupos 4a e 4b** (N0-40W/10°-30° para NE ou SW) são prováveis fraturas conjugadas geradas por regime tectônico compressivo com σ_1 horizontal de direção ao redor de N70E. Fraturas dos grupos 2a e 2b terminam nas fraturas do grupo 4, nas pedreiras GS3 e GS4.

Os **grupo 2b e 2c** formam um nítido par de fraturas conjugadas (falhas normais, Figura 9B), pois apresentem a mesma direção (EW) e mergulhos de 60° a 75° em sentidos opostos; o ângulo 2θ entre 30° e 50° indica que a propagação foi híbrida. Foram geradas em regime extensional com σ_3 de direção N-S e σ_1 vertical. A superfície de tais fraturas pode

Tabela 2. Síntese da Análise Tectônica com os eventos ordenados do mais antigo (base) para o mais novo (topo).

Grupo(s)	Modo de propagação	Tipo de falhas associadas	Orientação dos esforços principais
6a, 6b	Cisalhamento	Falhas inversas	σ_1 horizontal ~ NS σ_3 vertical
1	Híbrido	Falhas transcorrentes	σ_1 horizontal ~ N20-50W σ_3 horizontal ~ N40-70E
2d	Híbrido	-	σ_1 mergulha 50° para sul σ_3 mergulha 40° para Norte
2a, 2b, 2c	2a – extensional 2b+2c – híbrido a cisalhamento	Falhas normais	σ_1 vertical σ_3 horizontal ~ NS
4	Cisalhamento	Falhas inversas	σ_1 horizontal ~ ENE σ_3 vertical
3	?	?	σ_1 vertical ou σ_1 horizontal ~ N30E
5a, 5b	Cisalhamento/híbrido	Reativação da foliação, difícil determinação do regime tectônico e da orientação dos esforços	

apresentar plumas e estrias no rumo do mergulho, ambas consistentes com o caráter híbrido.

As fraturas do **grupo 2a** (direção E-W e mergulho subvertical) são consideradas como contemporâneas aos grupos 2b e 2c, pois apresentam intervalo de direções muito restrito (Figura 5), que é consistente com propagação extensional e com o campo de esforços que gerou os grupos 2b e 2c. Passagem transicional de fratura 2a para fratura 2c (Figura 8), reforça a contemporaneidade destes grupos. A ocorrência de fraturas extensionais (2a) e híbridas (2b e 2c) indica que houve mudança na magnitude dos esforços durante este evento tectônico, possivelmente em conjunto com atuação de pressão de fluidos. A presença de estrias de caimento baixo (10° e 35°) no grupo 2a é interpretada como reativação transcorrente, possivelmente pelo campo de esforços do grupo 1, pois fraturas deste grupo terminam em fraturas 2c (Figura 8).

Fratura do grupo 2d termina e encurva-se ao se aproximar de fratura 2b, sugerindo que esta última seja mais antiga. A variação contínua dos mergulhos, entre 60° e 40°, e a constância na direção (N75-85W, na GS3, e N60-80E, na GS4) para o grupo 2d, mais marcante na GS3, sugere que estas fraturas tenham sido geradas em um único evento, cujo regime de esforços é distinto daqueles das falhas andersonianas (Price e Cosgrove, 1990), com σ_1 de mergulho ao redor de 50°, para sul, posicionado na bissetriz do leque formado pelo grupo 2d, e σ_3 com mergulho de 40° para norte. O ângulo 2θ de 20° indica caráter híbrido. A proximidade de atitudes dos grupos 2b e 2d, com variação apenas nos valores do mergulho, sugere que houve rotação do esforço σ_1 , que era vertical, quando da geração do grupo 2b, e passou a mergulhar 50°, quando as fraturas do grupo 2d foram geradas.

As fraturas do **grupo 1** (N5-65W/subvertical) foram interpretadas como de cisalhamento ou híbridas, geradas em evento transcorrente, pois distribuem-se em um intervalo angular (presumivelmente 2θ) que varia de 45 a 50° (N15-65W, N10-55W e N5-50W, nas pedreiras GS1, GS3 e GS4, respectivamente). A direção do esforço máximo principal

(σ_1) situa-se no intervalo N20-50W, como indicado pelo diagrama de diedros retos (Figura 8D) e pelas direções do grupo 1 nas pedreiras GS1 e GS3, onde é mais marcante. Fraturas com plumas, de direção N35-40W (GS1) e dique, delimitado por fraturas N35W (GS3, Figura 8A, B), indicam componente extensional importante. Na GS3, a superfície de fratura N12W/79NE (78/79) apresenta alternância de faixas estriadas com faixas não estriadas, indicando movimento sinistral (Figura 8C). As faixas, no seu conjunto, desenharam uma pluma com eixo horizontal, sugerindo a coexistência dos modos de propagação por cisalhamento e por extensão na geração desta fratura, típico de fraturas híbridas. Estrias com caimentos oblíquos, de 45° a 70°, em falhas do grupo 1 (Figura 5C e 6C), sugerem reativação.

As fraturas do grupo 6a foram interpretadas como falhas inversas, como indicado pelas estrias no rumo do mergulho (GS3 e GS4) (Figura 9D e 9E). Portanto, este evento foi do tipo compressivo, com σ_1 horizontal de direção NS e σ_3 vertical, e posterior ao grupo 1, como indicado por terminação observada na GS3. O **grupo 6b** foi interpretado como conjugado do 6a, pois apresenta mesma direção, mas mergulho no sentido oposto. Este evento compressivo pode ter sido responsável pela reativação da foliação de gnaiss da pedreira GS1, gerando fraturas de mesma atitude que as do grupo 5b, que ocasionalmente podem terminar em fraturas grupo 1.

Finalmente, é importante ressaltar que as fraturas sub-horizontais ou de baixo ângulo observadas na área de estudo poderiam ser interpretadas, segundo o senso comum, como juntas de alívio, que poderiam tratar-se de fraturas extensionais ocasionadas por remoção de carga, devido a erosão. No entanto, fraturas extensionais são perpendiculares a um esforço mínimo principal (σ_3) extensional, e este não pode ser originado pela simples remoção de carga (o diagrama de Mohr-Griffith ilustra este controle; ver por exemplo, Cosgrove, 1998. Martel (2011) reforça estas considerações dizendo que atribuir a formação de juntas sub-horizontais, ou paralelas à superfície do terreno (referidas, em geral,

como *sheeting joints*), a alívio de carga é inconsistente com observações relevantes e, em seu artigo, conclui que tais estruturas são originadas por esforços tectônicos de regime compressivo atuando em conjunto com a curvatura da superfície do terreno.

Comparação com a literatura

A correlação dos eventos de deformação dútil aqui descritos com aqueles dos depósitos paleogênicos e neogênicos da Bacia de Taubaté e da Bacia de São Paulo não é simples, pois as rochas aqui analisadas são muito mais antigas. No entanto, uma tentativa de correlação é feita tendo como base o fato da área de estudo estar inserida no contexto tectônico que gerou a Bacia de São Paulo, pertencente ao Rifte Continental do Sudeste do Brasil – RCSB (Riccomini, 1989). As bacias do RCSB foram geradas por evento extensional proeminente, do Paleógeno, em que estruturas antigas do embasamento, principalmente de direção ENE, foram reativadas como falhas normais. Na área de estudo foi identificado um evento tectônico extensional, também proeminente, que corresponde ao que gerou as fraturas EW (a ENE no GS4), verticais e extensionais (grupo 2a), bem como falhas normais de mergulhos ao redor de 60-70° (grupos 2b e 2c). É importante realçar que a Bacia de São Paulo é delimitada a norte por estruturas de direção EW e, portanto, paralelas a esse grupo de fraturas.

Outro evento marcante na área de estudo, com uma quantidade de fraturas ainda maior que a dos grupos 2a, 2b e 2c, é o de caráter transcorrente que gerou as imponentes fraturas e zonas de fraturas do grupo 1, com σ_1 horizontal, de direção N35-50W. As relações de terminação entre os grupos de fraturas indicam que este é posterior ao evento que gerou os grupos 2a, 2b e 2c. Estruturas e regime de esforços semelhantes são descritos com frequência na literatura, não só para os depósitos do RCSB, mas também para outras partes do Estado de São Paulo. Tal evento de deformação é considerado neogênico e quaternário (Hasui et al., 1995) ou pleistocênico (Riccomini, 1989; Salvador e Riccomini, 1995; Hiruma et al., 2001). No entanto, o dique intrudido em fraturas do grupo 1, caso seja de origem alcalina e pertencente à última fase de magmatismo alcalino, de 55-40 Ma (Guedes et al., 2005), conferiria idade mínima do Paleógeno para tais fraturas. Esta hipótese, por enquanto, fica em aberto, pois a idade do dique não foi determinada, já que está muito alterado; no entanto, pode-se sugerir que o campo de esforços que gerou o grupo 1, pela sua forte expressão no Estado, tenha atuado em vários momentos da evolução da tectônica cenozóica e de forma alternada com os demais campos de esforços.

Os demais eventos identificados são subordinados e de difícil correlação com os descritos na literatura. Os grupos 4, 3, 5a e 5b são mais antigos que o grupo 2 e, portanto, anteriores à geração da Bacia São Paulo. Os grupos

2d, 6a e 6b, por outro lado, são possivelmente resultantes de variação lateral de esforços e específicos da região de estudo. Tais variações são esperadas para porções mais superficiais da crosta (Talbot e Sirat, 2001; Maloney et al., 2006). Com relação ao campo de esforços atual, não é possível extrapolar os dados regionais de esforço máximo horizontal (SH_{max}), apresentados em Assumpção et al. (2011), ao local da área de estudo, pois não existe detalhe de informações suficiente para isso.

Modelo geométrico da rede de fraturas e caminhos preferenciais de fluxo

O modelo geométrico (Figura 12) foi elaborado seguindo os princípios que são descritos a seguir.

Na área industrial do Jurubatuba e adjacências afloram mica-xistos e gnaisses. As perfilagens ópticas, realizadas nas porções mais superficiais dos poços por Fiume (2014), confirmam o amplo predomínio de gnaisses contendo bandas ora mais micáceas, ora mais quartzo-feldspáticas, cuja foliação varia muito de atitude, mostrando que está dobrada. Dentre as pedreiras visitadas, a que mais se assemelha a estas condições é a GS1 e, por este motivo, o modelo representa a atitude da foliação nele identificada. As fraturas de mergulhos elevados dos grupos 1, 2a, 2b, 2c e 3 estão bem representadas em três pedreiras, sendo, por este motivo, consideradas de ocorrência regional e, portanto, extrapoláveis para a área do Jurubatuba e representados no modelo. Os espaçamentos representados, medidos nas GS1, GS3 e GS4, oscilam, de forma aleatória, entre os valores mínimo e máximo (Figura 12). Os comprimentos são mais incertos que os espaçamentos; no entanto, espera-se que, pelo menos em parte, os grupos mais jovens terminem nos mais antigos, assim o comprimento dos primeiros é limitado pelo espaçamento dos segundos. Dos grupos de mergulho baixo, apenas o 5b, subparalelo à foliação, foi representado, pois os demais são de ocorrência mais restrita. Os grupos 7a e 7b não são representados por serem exclusivos da GS2.

A classificação relativa dos grupos de fraturas, em termos de fluxo preferencial, foi resultado da observação de feições diagnósticas de fluxo, tais como alteração e revestimento, da superfície da fratura, por hidróxidos de ferro (Tabela 3). Presença de vegetação e saídas de água deve ser considerada junto com a alteração da rocha, pois tais feições sozinhas podem ser resultado de fluxo de água causado pelas perturbações originadas da exploração das pedreiras. Para esta análise, apenas as GS1 e GS3 foram consideradas, pois a GS4 é uma pedreira rasa e está mais alterada de um modo geral, e a GS2 não é representativa dos grupos mais conspícuos da região estudada. Nota-se, na Tabela 3, que as porcentagens encontradas para a presença de hidróxido de ferro para a GS1 e GS3 indicam relações opostas, sendo que a maior diferença entre as pedreiras é que na GS1 a interconexão entre as fraturas é elevada e proporcionada pelas

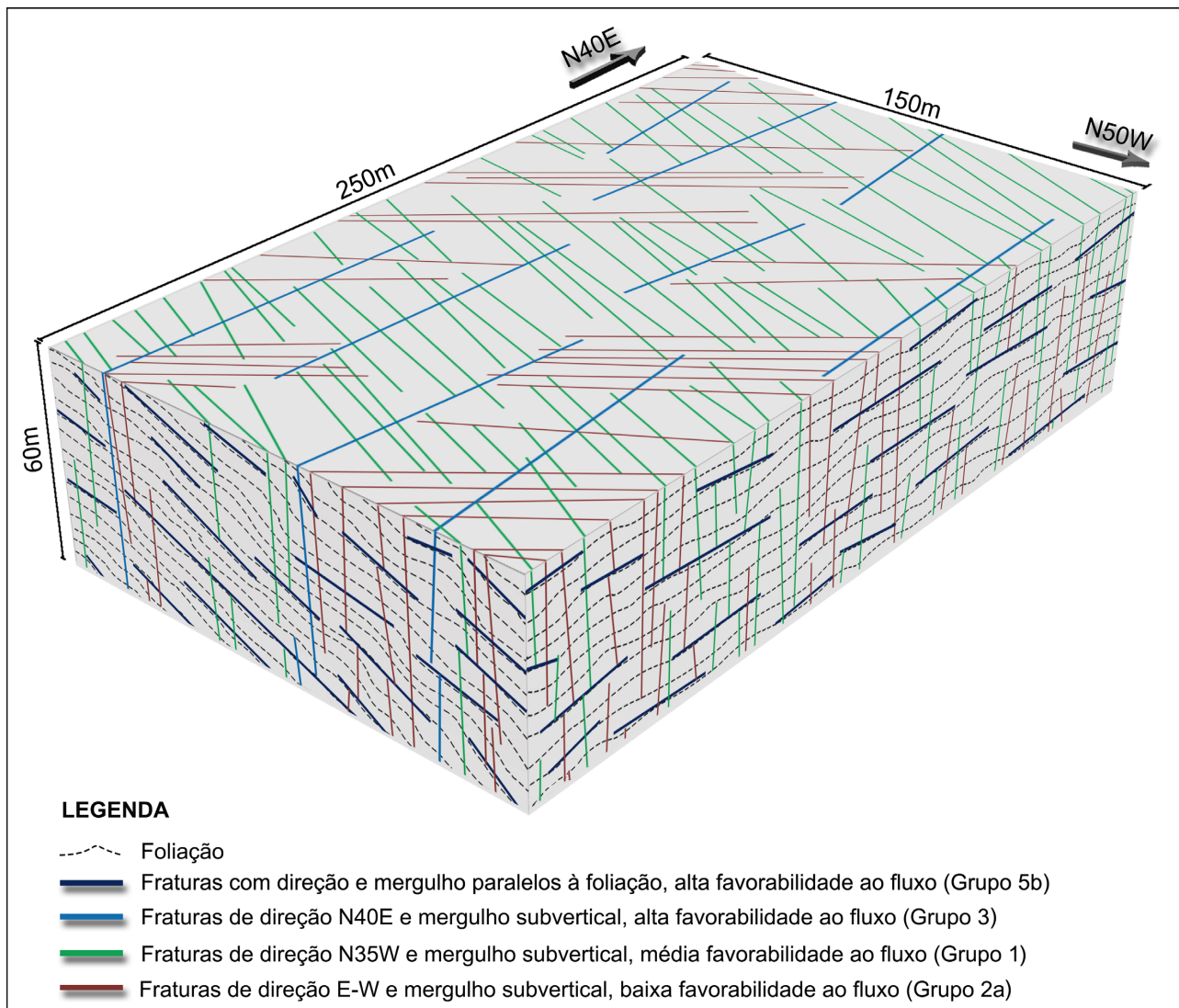


Figura 12. Modelo geométrico de fraturas representando os elementos de relevância ao fluxo de água subterrânea na área de estudo. Notar que os grupos 5b e 1 tendem a dominar o fluxo e que, apesar do grupo 1 tender a terminar no 5b, as suas zonas de fraturas propagam-se de forma contínua. Com relação às fraturas de mergulho baixo, apenas o grupo 5b foi representado, pois os grupos 4a, 4b, 5a, 6a, 6b são de ocorrência esparsa e localizada. O fato das fraturas mais antigas serem mais longas e tenderem a interromper a propagação das mais novas foi determinante para o traçado e continuidade dos vários grupos.

Tabela 3. Feições diagnósticas e as porcentagens observadas para os grupos de fratura. Assim, hidróxidos de Fe, para o grupo 1, foram observados em 70% (GS1, N=110) e 30% (GS3, N=141) das fraturas medidas; para o grupo 2a, 40% (GS1, N=11) e 2% (GS3, N=36), bem como 7% e 10%, para 2b (N=26) e 2d (N=40), respectivamente; para o grupo 3, 40% (GS1, N=13) e 60% (GS3, N=20). N = número de fraturas medidas.

Grupo	GS1			GS3		
	N	HidroxFe	Rocha Alt/Veg/Água	N	HidroxFe	Rocha Alt/Veg/Água
1	110	70%	0%	141	30%	10%
2a	11	40%	20%	36	16%	2%
2b	-	-	-	26	7%	0%
2d	-	-	-	40	10%	10%
3	13	40%	0%	20	60%	50%
5b	7		70% 10%	-	-	-

longas fraturas sub-horizontais (5b), paralelas à foliação. A conectividade na GS3 é bem menor, sendo razoável supor que a baixa porcentagem de hidróxidos de ferro nas fraturas dos grupos 2a, 2b e 2c é devida à menor conexão de tais fraturas. Assim, tal grupo teria menor importância para o fluxo devido a esta característica. Já o grupo 3, na GS3, apresenta grande continuidade e causou alteração terrosa intensa da rocha, sugerindo ser o de maior fluxo preferencial relativo nesta pedreira; no entanto, seu espaçamento é grande, o que reduz sua importância para o fluxo. Por fim, o grupo 1 é o grupo vertical de maior importância para o fluxo no contexto da GS1, sendo equiparável ao grupo 5b, sub-horizontal. Este último, devido ao espaçamento muito menor, ganha mais importância que o grupo 1, especialmente nas porções em que a foliação apresenta baixo ângulo ($\sim 30^\circ$ ou menor). Assim, em ordem crescente de importância para o fluxo temos: grupos 2a, 2b e 2d (2c não é considerado individualmente pela sua menor ocorrência); grupo 3; grupo 1 e grupo 5b.

As relações de terminação entre as fraturas são um aspecto importante no desenho do modelo geométrico, pois é um fator que limita o comprimento das fraturas, quando elas estão suficientemente próximas entre si. Assim, em linhas gerais, o modelo indica que a componente horizontal do fluxo será dominada em conjunto pela foliação e pelo grupo 5b; na vertical, o fluxo mais importante também deve ocorrer ao longo do grupo 1, onde este estiver presente, bem como ao longo do mergulho da foliação, ora para SE, ora para NW, com as linhas de charneira das dobras (de direção NE) constituindo um divisor para este fluxo. A importância de fraturas paralelas à foliação para o fluxo de água é enfatizada por Manda et al. (2008), pois podem aumentar a transmissividade do meio em 20 a 30%.

Com relação à evolução da deformação dútil na região estudada e aos efeitos do campo de esforços mais recente sobre o fluxo preferencial dos grupos de fraturas, sugere-se que o evento compressivo com σ_1 NS, possivelmente o evento tectônico mais recente na região estudada e que gerou os grupos 6a e 6b, teria o efeito de reativar, por cisalhamento, tanto o grupo 1 como o 3, proporcionando fluxos de água semelhantes para ambos; da mesma forma, pode ter reativado a foliação por cisalhamento. Por outro lado, teria o efeito de diminuir a abertura (e o fluxo) dos grupos 2a, 2b e 2c, o que também pode explicar o fluxo relativamente menor destes últimos na GS3; porém, não explica a indicação de fluxo (hidróxidos de Fe) nas fraturas 2a da GS1. É possível que exista, para um mesmo período de tempo, variação lateral na orientação dos esforços mais recentes dentro da região onde estão situadas as pedreiras. Brusca variação lateral de esforços, em regiões relativamente pequenas, já foi documentada na literatura (Talbot e Sirat, 2001), sendo que este comportamento é considerado comum nas porções mais superficiais da crosta, onde forças de primeira ordem podem ser sobrepujadas por fatores locais (Maloney et al., 2006).

CONCLUSÕES

O levantamento e análise estrutural realizados em quatro pedreiras próximas à área de interesse complementam, pelo menos parcialmente, os dados coletados na área industrial de Jurubatuba, pois mostram que alguns grupos de fraturas de mergulhos elevados são de ocorrência regional. A coleta de dados nas perfilagens dos poços verticais é representativa apenas para fraturas de baixo a médio ângulo de mergulho, e os dados de fraturas subverticais coletados nas pedreiras podem ser utilizados para se obter uma melhor aproximação da realidade na área do Jurubatuba. Em ordem decrescente de importância, quanto à sua frequência e continuidade, os grupos regionais são: fraturas N0-50W conjugadas ou híbridas, geradas em evento transcorrente com σ_1 N20-50W (grupo 1); fraturas EW, extensionais, subverticais (grupo 2a), ou de cisalhamento a híbridas com mergulho de 60 a 70° (grupos 2b e 2c), todas geradas durante regime tectônico de falhas normais com σ_3 de direção NS, correlacionável ao evento extensional que gerou a Bacia São Paulo, dentro do contexto do RCSB; e NE, de grande espaçamento e mergulhos variando entre 60 e 90° (grupo 3). Dentre os grupos de mergulhos baixos, destacam-se as fraturas N10-40E, com mergulhos de 10 a 30° predominantemente para SE e subparalelas à foliação de gnaisses, sendo de pequeno espaçamento e grande extensão lateral (grupo 5b). Os demais grupos de mergulho baixo são de ocorrência mais localizada, destacando-se o de direção EW; fraturas de cisalhamento geradas por regime tectônico de falhas reversas com σ_1 de orientação NS, e correspondente ao campo de esforços mais recente identificado na área de estudo (grupos 6a e 6b).

A GS1, por ser constituída de gnaisses, é considerada o melhor análogo da área do Jurubatuba; assim, o modelo geométrico reproduz suas principais características, que são foliação de baixo a médio mergulho, que exerce controle importante na propagação dos demais grupos de fraturas. A foliação com mergulho baixo para SE é intensamente reativada, gerando fraturas contínuas (grupo 5b), ao longo das quais indícios de fluxo são importantes, indicando ocorrência de fluxo preferencial. Zonas de fraturas NW subverticais (grupo 1), de grande continuidade, constituem caminhos de fluxo preferencial também significativo e devem controlar o fluxo vertical onde estiverem presentes. As fraturas subverticais NE (grupo 3), apesar de serem transmissivas em alguns locais, apresentam grande espaçamento, sugerindo serem de importância apenas local para o fluxo. Finalmente, as fraturas EW (subverticais ou de mergulho médio), apesar de serem frequentes, são as de menor fluxo relativo. As charneiras das dobras com eixo NE podem constituir divisores de fluxo de água subterrânea. Sugere-se que o evento mais recente, de falhas reversas com σ_1 NS (grupos 6a e 6b), pode contribuir para as maiores transmissividades, tanto da foliação como das fraturas NW e NE (grupos 1 e 3), pois propiciaria reativação destas estruturas por cisalhamento,

ao passo que reduziria a transmissividade das fraturas EW (subverticais e de mergulhos intermediários, grupos 2a, 2b e 2c). Os resultados de análise estrutural de dados coletados em perfilações acústicas e ópticas e de velocidade de fluxo em poços verticais, a serem publicados em breve, bem como os ensaios hidráulicos a serem realizados, também na área do projeto Jurubatuba, deverão fornecer dados relevantes para avanço do modelo geométrico aqui proposto no sentido de obtenção de um modelo conceitual de fluxo.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos às empresas Embu SA (GS1), Grupo Votorantim (GS3) e Grupo Basalto (GS2 e GS4), que permitiram que visitássemos as pedreiras inúmeras vezes, conferindo-nos todo o apoio necessário. Sem esta colaboração, o presente trabalho não teria sido possível. Agradecemos à FINEP, que financiou os trabalhos de campo no âmbito do projeto JURUBATUBA, bem como à CAPES E FAPESP, que forneceram bolsa de Mestrado à aluna Bruna Fiume. Agradecemos aos então estudantes do curso LiGEA-IGcUSP, Elthon Nakashima, e do curso de Mestrado do IGc-USP, Marcelo A. Freimann, pelas importantes colaborações nos trabalhos de campo. Finalmente, agradecemos aos três relatores anônimos da Revista Geologia USP que contribuíram, com sugestões relevantes, para a melhoria deste texto.

REFERÊNCIAS

Almeida, F. F. M. (1976). The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 48(Supl), 15-26.

Alves, F. M. (2008). *Tectônica rúptil aplicada ao estudo de aquífero em rochas cristalinas fraturadas na região de Cotia, SP*. Tese (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo – USP.

Angelier, J., Mechler, P. (1977). Sur une methode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en seismologie: la methode des diedres droits. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7, 1309-1318.

Assumpção, M., Loper, A. E. V., Zevallos, I., Ferreira, J. M., Nascimento, A. (2011). Intraplate stress field in Brazil from earthquake focal mechanisms. *Conferencia Internacional en Homenaje a Alberto Giesecke*. Lima: CERESIS.

Barton, C. A., Zoback, M. D., Moos, D. (1995). Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology*, 23(8), 683-686.

Cosgrove, J. W. (1998). The role of structural geology in reservoir characterization. *Geological Society of London, Special Publications*, 127(1), 1-13.

Fernandes, A. J., Maldaner, C. H., Rouleau, A. (2011). Análise das fraturas nos basaltos de Ribeirão Preto, SP: aplicação à elaboração de modelo hidrogeológico conceitual. *Geologia USP: Série Científica*, 11(3), 43-64.

Fernandes, A., Rudolph, D. L. (2001). The influence of Cenozoic tectonics on the groundwater-production capacity of fractured zones: a case study in Sao Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal*, 9(2), 151-167.

Ferrill, D. A., Winterle, J., Wittmeyer, 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.

Fiume, B. (2014). *Geologia estrutural de detalhe para elaboração de modelo conceitual de circulação de água subterrânea: estudo de caso em Jurubatuba, SP*. Tese (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo – USP.

Guedes, E., Heilbron, M., Vasconcelos, P. M., Morisson Valeriano, C., Almeida, J. C. H., Teixeira, W., Thomaz Filho, A. (2005). K–Ar and 40 Ar/39 Ar ages of dikes emplaced in the onshore basement of the Santos Basin, Resende area, SE Brazil: implications for the south Atlantic opening and Tertiary reactivation. *Journal of South American Earth Sciences*, 18(3), 371-382.

Hasui, Y., Facincani, E. M., Santos, M., Jimenez-Rueda, J. R. (1995). Aspectos estruturais e neotectônicos na formação de boçorocas na região de São Pedro, SP. *Geociências*, 14(2), 59-76.

Heilbron, M., Pedrosa-Soares, A. C., Campos Neto, M. D. C., Silva, L. D., Trouw, R. A. J., Janasi, V. A. (2004). Província Mantiqueira. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C. D. R. Carneiro, B. B. Brito-Neves (Eds.), *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, 203-234. São Paulo: Beca.

Hiruma, S. T., Riccomini, C., Modenesi-Gauttieri, M. C. (2001). Neotectônica no planalto de Campos do Jordão, SP. *Revista Brasileira de Geociências*, 31(3), 375-384.

Maloney, S., Kaiser, P., Vorauer, A. (2006). A reassessment of in situ stresses in the Canadian Shield. *Golden Rocks 2006, The 41st US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association.

Manda, A. K., Mabee, S. B., Wise, D. U. (2008). Influence of rock fabric on fracture attribute distribution and implications for groundwater flow in the Nashoba Terrane, eastern Massachusetts. *Journal of Structural Geology*, 30(4), 464-477.

- Martel, S. J. (2011). Mechanics of curved surfaces, with application to surface-parallel cracks. *Geophysical Research Letters*, 38(20)
- 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(1), 100-112.
- Pino, D. S. (2012). *Structural hydrogeology in the Kenogamy Uplands, Quebec, Canada*. Tese (Doutorado). Chicoutimi: L'Université du Québec à Chicoutimi.
- Price, N. J., Cosgrove, J. W. (1990). *Analysis of geological structures*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Priest, S. D. (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*. London: Chapman & Hall.
- Riccomini, C. (1989). *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo – USP.
- Riccomini, C., Coimbra, A. M. (1992). Geologia da Bacia Sedimentar. In: A. Negro Junior, A. A. Ferreira, U. R. Aonso, P. A. Luz (Ed.), *Solos da cidade de São Paulo*, 37-94. São Paulo: ABMS/ABEF.
- Riccomini, C., Sant'Anna, L. G., Ferrari, A. L. (2004). Evolução geológica do rift continental do Sudeste do Brasil. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C. D. R. Carneiro, B. B. Brito-Neves (Eds.), *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, 383-405. São Paulo: Beca.
- 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.
- SABESP/CEPAS-IGc-USP. (1994). *Diagnóstico hidrogeológico da Região Metropolitana de São Paulo: diagnóstico final*. São Paulo: SABESP, Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas do IGc-USP.
- Salvador, E. D., Riccomini, C. (1995). Neotectônica do alto estrutural de Queluz (SP-RJ, Brasil). *Brazilian Journal of Geology*, 25(3), 151-164.
- Talbot, C. J., Sirat, M. (2001). Stress control of hydraulic conductivity in fracture-saturated Swedish bedrock. *Engineering Geology*, 61(2), 145-153.
- Terzaghi, R. D. (1965). Sources of error in joint surveys. *Geotechnique*, 15(3), 287-304.
- Wahnfried, I. (2010). *Modelo conceitual de fluxo do Aquífero de Serra Geral e do Sistema Aquífero Guarani na região de Ribeirão Preto, SP*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências - USP.