

CARACTERIZAÇÃO DOS GRUPOS DE FRATURAS E IDENTIFICAÇÃO DOS MAIS TRANSMISSIVOS EM AQUÍFERO CRISTALINO, EM SÃO PAULO (SP)

Bruna Fiume ¹, Amélia J. Fernandes ², Marcos Barbosa ³, Reginaldo Bertolo ³, Ricardo Hirata ³

¹ CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Av. Brasil, 1731. Belo Horizonte (MG). bruna.fiume@cprm.gov.br.

² IG – Instituto Geológico. R. Joaquim Távora, 822. São Paulo (SP). amelia.jfernandes@gmail.com

³ CEPAS|USP. Rua do Lago, 562. São Paulo (SP). marbbar@gmail.com; bertolo@usp.br; rhirata@usp.br

Palavras-Chave: fraturas transmissivas; aquífero cristalino; perfilagens geofísicas

INTRODUÇÃO

Apesar da extensa área de ocorrência de aquíferos fraturados, superior a 50% do território brasileiro, são poucos os estudos que têm se dedicado a entender os caminhos preferenciais do fluxo de água nesses aquíferos. Sendo o fluxo subterrâneo condicionado pelas discontinuidades rúpteis das rochas (fraturas), faz-se necessário, além da caracterização geométrica da rede de fraturas, a identificação daquelas que são mais transmissivas. Sendo assim, este trabalho emprega duas metodologias, que se baseiam no levantamento de dados de geologia estrutural de detalhe em afloramentos e a integração desses resultados com perfilagens geofísicas de poços. Ambos os métodos foram utilizados para elaboração de um modelo conceitual de fluxo subterrâneo ao sul da cidade de São Paulo (SP). Os resultados foram obtidos inicialmente por Fiume (2013), como parte de projeto mais amplo de caracterização de contaminação de aquíferos por solventes organoclorados na área industrial do Jurubatuba, tendo sido complementados pelos resultados de novas perfilagens com *flowmeter* e, também, por dados de afloramentos (Fernandes et al. 2016).

METODOLOGIA

Devido à ausência de rochas expostas em área de densa ocupação urbana na cidade de São Paulo, o levantamento de dados estruturais em afloramentos foi realizado em pedreiras que se inserem no mesmo contexto tectônico da área de estudo, a oeste da Bacia Sedimentar de São Paulo, dentro do Complexo Embu (Figura 1). O levantamento de fraturas ocorreu de forma sistemática ao longo de *scanlines* (linhas de amostragem), em paredes planas e extensas, bem como em observações pontuais, como preconizado por Rouleau & Gale (1985).

Quatro poços ao lado do canal Jurubatuba foram perfilados com as técnicas: calíper mecânico, que registra as variações de diâmetro do poço; imageamento óptico (OPTV) e acústico (HRAT), a partir das quais são identificadas as estruturas planares com suas respectivas atitudes; e *flowmeter*, que fornece a variação da velocidade do fluxo em trechos específicos do poço.

A identificação dos grupos de fraturas foi feita separadamente para cada poço e afloramento (pedreira), a partir da análise de densidade dos polos de fraturas em estereogramas gerados pelo *software DIPS*. A fim de diminuir o viés de amostragem causado pelo ângulo da fratura com a orientação da linha de amostragem (α), em que fraturas paralelas à linha de amostragem são subamostradas em relação às fraturas perpendiculares, utilizou-se uma adaptação da correção de Terzaghi (1965), elaborada por Pino (2012). Essa correção é importante para a análise da densidade dos polos de fraturas em estereogramas, bem como para o cálculo do espaçamento das fraturas pertencentes a um mesmo grupo, em que não devem ser consideradas fraturas com α inferior a 20°.

Para analisar os grupos de fraturas em relação à favorabilidade ao fluxo, nos afloramentos foram observadas feições como alteração ou revestimento por hidróxidos de ferro da superfície da fratura. Nos poços, as medições com o *flowmeter* foram realizadas em condições naturais e sob bombeamento, em trechos previamente determinados pelo índice de fluxo, resultante da classificação visual de fraturas

possivelmente mais abertas, conforme a análise conjunta da variação do diâmetro do poço indicado pelo calíper e da espessura do traço da fratura nas imagens OPTV e HRAT. Os valores de vazão obtidos pelo *flowmeter* foram classificados em intervalos determinados com base nas quebras naturais observadas em gráficos de frequência acumulada, resultando em 4 classes de vazão: insignificante (<0,2 L/min), baixa (0,2 a 0,5 L/min), média (0,6 a 2,0 L/min) e (4) alta (> 2,0 L/min).

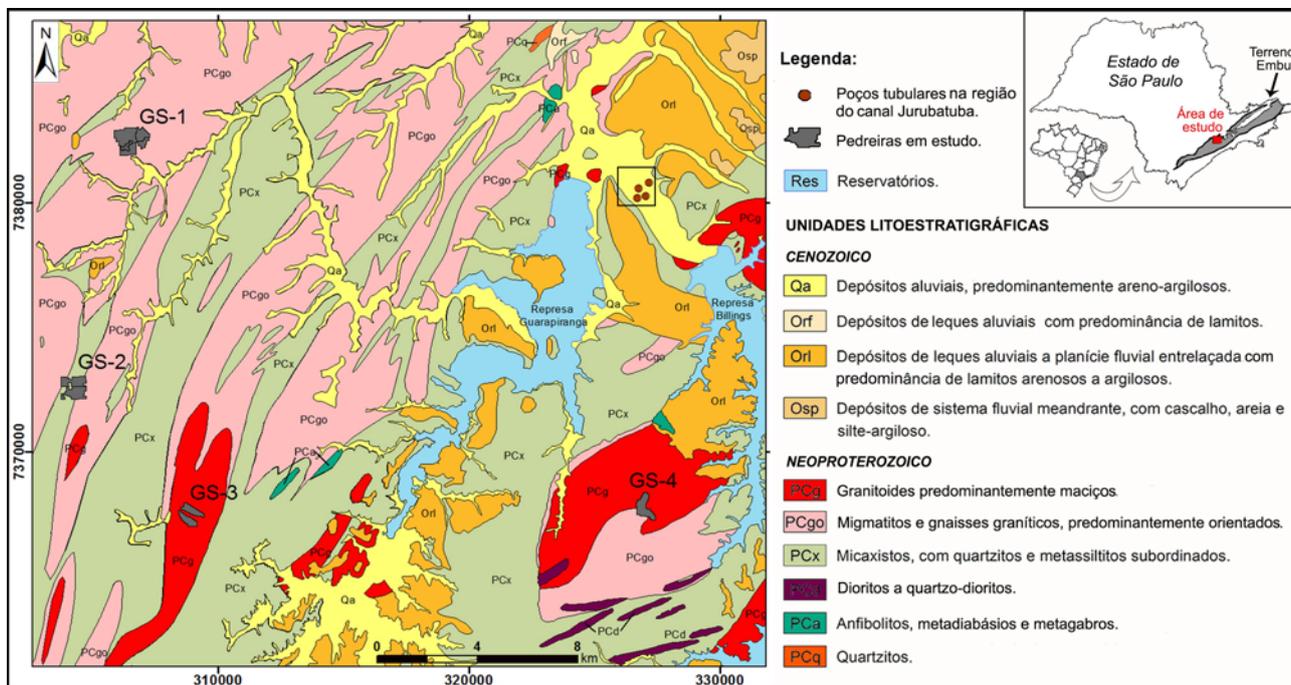


Figura 1. Geologia com localização dos poços perfilados na região de Jurubatuba e das pedreiras utilizadas para levantamento estrutural em afloramentos dentro do Complexo Embu (Fernandes et al., 2016)

RESULTADOS

Através das imagens OPTV, a geologia local pode ser caracterizada pela presença de gnaiss fino, rico em minerais máficos, com bandas de pegmatitos e xistos e, secundariamente, migmatitos. A geologia das pedreiras estudadas consiste em gnaisses e granitos maciços pré-cambrianos.

As fraturas identificadas nas imagens OPTV e HRAT dos poços possibilitaram a definição de 5 grupos de fraturas, classificados em ordem decrescente de número de fraturas (grupo G1 a G5). O G1 caracteriza-se por seu paralelismo à foliação e está presente predominantemente em todos os poços. As fraturas do G1 apresentam grande variação na direção e no mergulho, em geral variando entre 10° e 40°. Tal variação é resultante da foliação afetada por dobras cilíndricas de eixo sub-horizontal NE, evidentes nos poços e muito semelhantes à dobra identificada por Fernandes et al. (2016) na pedreira GS1, constituída de gnaiss. Os outros grupos de fraturas possuem as seguintes atitudes médias: direção EW e mergulho superior a 60° (G2), direção N20-50E e mergulho superior a 60° (G3), direção EW e mergulho entre 45° e 65° (G4) e direção NNW e mergulho superior a 60° (G5), sendo todos correlacionáveis aos grupos de fraturas de Fernandes et al. (2016) e de Fiume (2013). A maior diferença em relação aos grupos de fraturas diz respeito ao de direção NNW, subvertical, que nas pedreiras ocorre de forma mais significativa e predominantemente na direção NW. O G2 é o único com mergulhos elevados que aparece em todos os poços, indicando maior relevância da direção EW em relação às demais.

Com relação aos espaçamentos obtidos para os grupos de fraturas também se verifica uma semelhança entre os dados obtidos nos poços e nos afloramentos, principalmente com relação ao G1, que ocorre em torno de 0,7 metros. Entretanto, o caráter bimodal dos espaçamentos dos grupos E-W e NW, subverticais, condicionado pela presença de zonas de fraturas, é caracterizado apenas nos dados dos

afloramentos. Além disso, a ausência de fraturas dos grupos G3, G4 e G5 em mais de um poço indica que os seus espaçamentos podem ser maiores do que os calculados. Sendo assim, considera-se que o uso conjunto dos dados de espaçamento obtidos em afloramentos fornece os *end-members* dos espaçamentos obtidos nos poços, diminuindo a incerteza dos modelos conceituais.

De acordo com os resultados do *flowmeter*, no total, foram identificados 16 trechos com variação de vazão (dQ) significativa, os quais não são influenciados pela profundidade. Verificou-se correlação positiva entre a presença de fraturas classificadas visualmente com alto índice de fluxo e variação de vazão identificada pelo *flowmeter*, pois 70% dessas fraturas ocorrem nos intervalos com dQ significativa, sendo 38% relacionadas a trechos com dQ alta. Contudo, 7 dos 16 intervalos com vazão significativa possuem fraturas com índice de fluxo baixo e insignificante, o que enfatiza a necessidade da utilização do *flowmeter* para a identificação das fraturas transmissivas.

Nos trechos com dQ significativa ocorrem várias fraturas, o que dificulta a identificação das fraturas responsáveis de fato pela variação da vazão. Desse modo, utilizou-se como critério, as fraturas classificadas com maior índice de fluxo. Em todos os 16 intervalos predominam as fraturas do G1, sendo que a maioria das fraturas com índice de fluxo alto e médio pertence a esse grupo, com exceção de três intervalos, onde se têm fraturas com índice de fluxo alto do G3 (direção NE e mergulho $> 60^\circ$) e fraturas com índice de fluxo médio do G5 (direção NNW e mergulho $> 60^\circ$). No entanto, em apenas um desses casos não ocorre nenhuma fratura do G1 com índice de fluxo alto, em que a variação da vazão pode estar exclusivamente relacionada à fratura do G3 com alto índice de fluxo.

Assim como observado nos dados de poços, os levantamentos nos afloramentos demonstraram que as fraturas relacionadas ao G1 também são as mais transmissivas, conforme apresentado no modelo conceitual de fluxo de Fernandes et al. (2016). Os autores também concluíram que as fraturas de mergulhos subverticais de direções NE e NW, correlatas aos grupos G3 e G5, respectivamente, também contêm fraturas transmissivas, o que corrobora os indícios de fluxo alto e médio verificados nos poços, ainda que em baixo número.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que ambas as abordagens, levantamento de dados de fraturas em afloramentos e através de perfilagens de poços, fornecem informações que permitem a identificação dos principais grupos de fraturas e dos grupos mais importantes para o fluxo da água subterrânea. Além disso, os resultados mostraram-se bastante semelhantes entre si, apesar das limitações metodológicas apresentadas, como: a distância entre os locais estudados, a baixa amostragem de fraturas com mergulho subvertical nos poços e a dificuldade em isolar fraturas de um mesmo grupo nas perfilagens com o *flowmeter*.

No entanto, apesar do uso das perfilagens geofísicas permitir a identificação dos intervalos dos poços mais significativos para a entrada e a saída de água e o detalhamento dos grupos de fraturas, principalmente, daqueles com mergulho inferior a 60° , o presente trabalho sugere que os dados coletados em poços devem ser usados em conjunto com dados complementares, obtidos em outras escalas, para diminuir o grau de incerteza dos parâmetros necessários na elaboração de modelos conceituais de fluxo em aquíferos fraturados, conforme também sugerido por Paillet & Ollila (1994) e Paillet & Pedler (1996).

Sendo assim, o levantamento de dados em afloramentos é considerado fundamental para uma caracterização adequada das fraturas, principalmente, a fim de contornar o viés de amostragem dos grupos de fraturas subverticais resultante da perfilagem de poços. Além disso, os levantamentos em afloramentos também são indispensáveis para a classificação das fraturas quanto ao índice de fluxo, bem como na obtenção dos demais parâmetros geométricos da rede fraturas, como espaçamento, comprimento e

conectividade; esta última é considerada por Long et al. (1982) tão importante quanto à abertura na determinação dos caminhos preferenciais de fluxo em aquíferos fraturados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fernandes, A.J.; Fiume, B.; Bertolo, R.; Hirata, R.C.A. Modelo geométrico de fraturas e análise da tectônica rúptil aplicados ao estudo do fluxo do aquífero cristalino, São Paulo (SP). *Geologia USP. Série Científica*, vol.16, n.3, p.71-88. 2016.
- Fiume, B. Geologia estrutural de detalhe para elaboração de modelo conceitual de circulação de água subterrânea: estudo de caso em Jurubatuba, SP. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 165 p. 2013.
- Long, J.C.S.; Remer, J.S.; Wilson, C.R.; Witherspoon, P.A. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. *Water Resour. Res.*, vol. 18, n.3, p.645-658. 1982.
- Paillet, Fl. & Ollila, P. 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. 1994.
- Paillet, F.L. & Pedler, H.W. Integrated borehole logging methods for wellhead protection applications. *Engineering Geology*, v.42, p.155-165. 1996.
- Pino, D.S. Structural Hydrogeology in the Kenogamy Uplands, Quebec, Canada. Thesis (Master), L'Université du Québec à Chicoutimi, Quebec, 184 p. 2012.
- Rouleau, A. & Gale, J.E. Statistical characterization of the fracture system in the Stripa granite, Sweden. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol.22, n.6, p.353-367. 1985.
- Terzaghi, R.D. Sources of error in joint surveys. *Geotechnique*, vol.15, n.3, p.287-304. 1965.