



Fluxo em maciços cristalinos: Caracterização de zonas fraturadas utilizando perfilagem geofísica

André C. G. Kowalski¹

¹Departamento de Geofísica, IAG/USP

Copyright 2016, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Ouro Preto, 25 a 27 de outubro de 2016. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VII SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

Studying fluid flow through crystalline rocks can be complex due to heterogeneity of such media. In this type of formations, water or contaminants are mainly transported through a network of conduits formed by discrete fractured zones. Geophysical well-logging can provide information about physical properties of fractured zones which can be used for better understanding about flow regime through rock mass. This study presents results from resistivity and optical logging at a field test site revealing the importance of geophysical probes in characterizing fractures allowing in and out groundwater flow in the borehole. Statistical data provided by geophysical logs provided estimates of critical fracture length in order to bypass the percolation threshold. For further characterization of the flux network, flowmeter probes could provide valuable information on transmissivity and hydraulic heads for each inflow/outflow zone.

Introdução

O estudo de fluxo em maciços cristalinos é importante, pois este tipo de rocha pode estar associado a áreas nas quais há a necessidade de gestão de recursos hídricos (Boutt et al., 2010; Boisson et al., 2015), quando da escolha de locais adequados para o descarte de resíduos radioativos (Karasaki et al., 2000) ou em estudos de geotecnia (Stumm et al., 2007). Essas formações são caracterizadas por rochas ígneas e metamórficas com baixa permeabilidade de maneira que o fluxo de água ou contaminantes fica condicionado à presença de zonas fraturadas.

A perfilagem geofísica de poço fornece informações sobre as propriedades físicas do meio perfurado através da utilização de diferentes tipos de sondas. Esses sensores permitem detectar variações existentes no meio devido, por exemplo, à mudança de litologia com a profundidade, presença de minerais condutivos ou zonas fraturadas. Como o fluxo em rochas cristalinas está associado à presença de fraturas, a perfilagem é uma ferramenta eficiente na caracterização do regime de fluxo neste tipo de formação.

A escala de investigação é um fator que deve ser levado em consideração, pois através de levantamentos realizados em um único poço as informações obtidas estão relacionadas à sua vizinhança. Para caracterizar a comunicação em escala regional entre fraturas é preciso

realizar levantamentos e testes ao longo de diversos poços presentes na área (Paillet, 2013).

Neste estudo são realizados levantamentos utilizando os métodos de perfilagem óptica e resistividade para localizar as principais zonas fraturadas em um poço e determinar a densidade linear de fraturas permitindo determinar o limite de percolação. Este limite é entendido como sendo a extensão mínima para uma fratura em particular garantir a continuidade do fluxo de água pela totalidade do maciço (Zimmermann et al., 2005).

Limites de percolação

Segundo Bour e Davy (1997), representando as fraturas no poço através de um modelo discreto, no qual seus comprimentos são constantes (l) e suas distribuições aleatórias, o parâmetro de percolação pode ser utilizado para definir quantitativamente o limite de percolação a partir do número de fraturas (N) e da área de superfície da rede discreta (A):

$$p = Nl^2/A = \lambda_A l^2 \quad (1)$$

Onde λ_A é a densidade superficial de fraturas na área. Assumindo um comprimento médio teórico das fraturas (μ_L) é possível obter uma relação entre a frequência linear de fraturas no poço (λ_L) e a densidade de fraturas na área (λ_A) (Zimmermann et al., 2005):

$$\frac{2}{\pi} \lambda_A \mu_L \leq \lambda_L \leq \lambda_A \mu_L \quad (2)$$

Nesta relação, uma distribuição aleatória das fraturas está associada ao limite inferior da inequação enquanto o limite superior corresponde à situação na qual a distribuição das fraturas é paralela. Pelas equações 1 e 2, o parâmetro de percolação pode ser definido como:

$$p = N\mu_L^2/A = \lambda_A \mu_L^2 \geq \lambda_L \mu_L \quad (3)$$

Metodologia

Perfilagens que realizam o imageamento óptico (OBHTV – Optical Borehole Televiewer) da parede do poço permitem que sejam determinadas as principais zonas fraturadas assim como suas aberturas, orientações e inclinações (Williams e Johnson, 2004). O método consiste em realizar a filmagem 360° da parede interna

do poço através de uma câmera acoplada na sonda em conjunto com uma fonte de iluminação. As imagens obtidas são orientadas através de um magnetômetro e um inclinômetro localizados no topo da sonda. Este método, no entanto, apresenta algumas desvantagens, como a necessidade do poço estar vazio ou preenchido por fluidos com boa visibilidade. Além disso, as informações são obtidas somente com base nas imagens, ou seja, não representam necessariamente a formação além da parede do poço.

Por outro lado, a perfilagem geofísica de resistividade pode ser aplicada para obter informações de um volume maior da formação na vizinhança do poço. Para isso, uma corrente artificial controlada é aplicada no meio através de eletrodos de corrente enquanto o potencial elétrico é medido por eletrodos na sonda e em superfície (eletrodos de potencial), permitindo encontrar a resistividade da formação (Keys, 1990). Este tipo de levantamento é conhecido como perfilagem normal de resistividade. Segundo o mesmo autor, a resistividade aparente, R_a (ohm.m), de um meio infinito é definida adicionando um fator geométrico à Lei de Ohm:

$$R_a = \frac{U}{I} \times 4AM \quad (4)$$

Onde I é a corrente aplicada no meio (A), U é o potencial elétrico (V) medido, e a distância AM (m) é o espaçamento entre os eletrodos de corrente A e potencial M . Uma mesma sonda pode conter diversos arranjos de eletrodos, permitindo investigar diferentes volumes da formação e obter mais de uma curva para os valores de resistividade. Neste estudo, o equipamento permitiu realizar a perfilagem *single point resistance* (SPR), que consiste em um circuito composto por apenas um par de eletrodos (um para corrente e outro de potencial), cujo volume de investigação é diretamente proporcional ao diâmetro do eletrodo presente na sonda e apresenta maior sensibilidade às variações próximas à parede do poço do que a perfilagem de resistividade normal (Keys, 1990).

As medidas obtidas pela perfilagem elétrica são apresentadas em formato de perfil com a distribuição dos valores de resistividade pela profundidade enquanto as imagens obtidas através da perfilagem óptica são planificadas permitindo determinar as orientações e frequência das estruturas identificadas durante a interpretação.

Resultados e discussão

Os dados de perfilagem geofísica foram obtidos em um poço do Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG – USP (Porsani et al., 2004). O poço utilizado para teste possui diâmetro de 4" e encontra-se revestido na parte sedimentar, composta por arenitos e argilitos da Bacia de São Paulo, porém sem revestimento no intervalo de 53 a 77 metros de profundidade que intercepta rochas granito-gnáissicas. A aquisição de dados foi realizada em todo o poço utilizando como profundidade zero o nível do solo.

Os resultados obtidos a partir do imageamento óptico da parede do poço são apresentados na Figura 1.

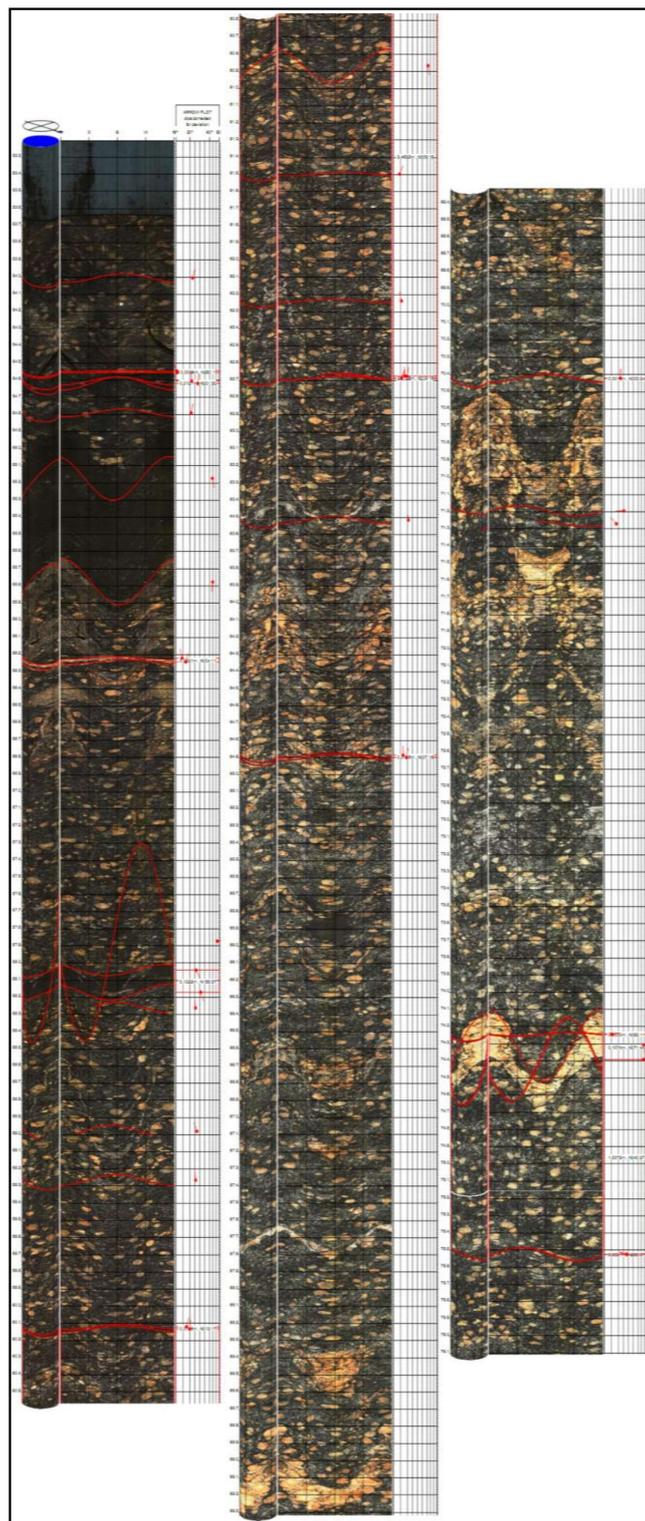


FIGURA 1 – Resultados obtidos pelo método OBHTV. As fraturas (linhas vermelhas) foram interpretadas visualmente e suas orientações e inclinações são determinadas utilizando a planificação da imagem do poço.

A análise das imagens permitiu identificar diferentes estruturas incluindo foliações e fraturas ao longo do embasamento cristalino. No total foram encontradas 32 fraturas com aberturas variando entre valores imperceptíveis até a ordem de centímetros, como pode ser observado na Tabela 1.

Profundidade (m)	Azimuth	Mergulho (°)	Abertura (m)
54.006	N016	25.4	0
54.605	N358	23.3	0
54.619	N003	36.1	0.0126
54.799	N012	22.5	0
56.224	N343	8.9	0
56.246	N018	14.1	0.0221
57.879	N076	83.8	0
58.268	N355	31.3	0
58.984	N339	34	0
59.268	N354	31.5	0
60.121	N016	15.3	0
60.133	N009	19.5	0.0118
61.502	N026	8.8	0
62.24	N345	11.3	0
62.676	N355	16.1	0.001
62.677	N009	19.7	0
62.687	N028	11.5	0
62.69	N025	11.1	0.0029
63.523	N354	21.8	0
64.889	N000	13.7	0
64.903	N012	18.7	0.0135
70.425	N004	23.8	0
70.426	N003	24	0.0011
71.196	N270	30.9	0
71.272	N313	16.9	0
74.245	N082	10.2	0
74.248	N081	10.8	0.003
74.309	N175	77.4	0
74.393	N073	77.1	0
74.393	N069	77.3	0
75.524	N284	37.5	0
75.527	N282	37.5	0.0021

Tabela 1 – Fraturas identificadas pela perfilagem OBHTV e suas respectivas orientações e aberturas. Algumas fraturas não puderam ter suas aberturas determinadas pela interpretação das imagens e foram, portanto, definidas com valor zero.

É preciso ressaltar que estas aberturas são obtidas a partir da interpretação visual dos resultados obtidos pelo perfil OBHTV, ou seja, os valores podem não ser representativos da abertura real das fraturas uma vez que a investigação não fornece detalhes sobre a formação além da parede do poço. Além disso, as fraturas não são planos perfeitamente paralelos, portanto não possuem abertura constante ao longo de toda sua extensão.

Dentre as fraturas identificadas na Tabela 1, podem-se destacar quatro (ver Tabela 2), com aberturas da ordem de centímetros, sugerindo a hipótese de que estas estruturas apresentam maior possibilidade de participarem do fluxo de água no poço.

Profundidade (m)	Abertura (m)
54.619	0.0126
56.246	0.0221
60.133	0.0118
64.903	0.0135

Tabela 2 – Principais zonas fraturadas (maiores aberturas) identificadas a partir perfil OBHTV.

Apesar de não fornecer informações referentes à formação além do revestimento, o imageamento óptico permitiu observar as conexões entre os segmentos de PVC que revestem o poço. Em alguns pontos foi detectada a presença de ferrugem tanto em direção ascendente como descendente indicando que pode estar ocorrendo fluxo entre essas ligações.

As perfilagens elétricas forneceram informações sobre as propriedades físicas das rochas presentes na formação perfurada pelo poço. Os perfis de resistividade *single-point resistance* e normal foram obtidos utilizando uma sonda com dois espaçamentos entre os eletrodos A e M: 16" e 64" (uma polegada \cong 2.54 centímetros), sendo referenciados como espaçamento curto e longo, respectivamente e são apresentados na Figura 2 em conjunto com as zonas fraturadas identificadas na Tabela 2 para comparação.

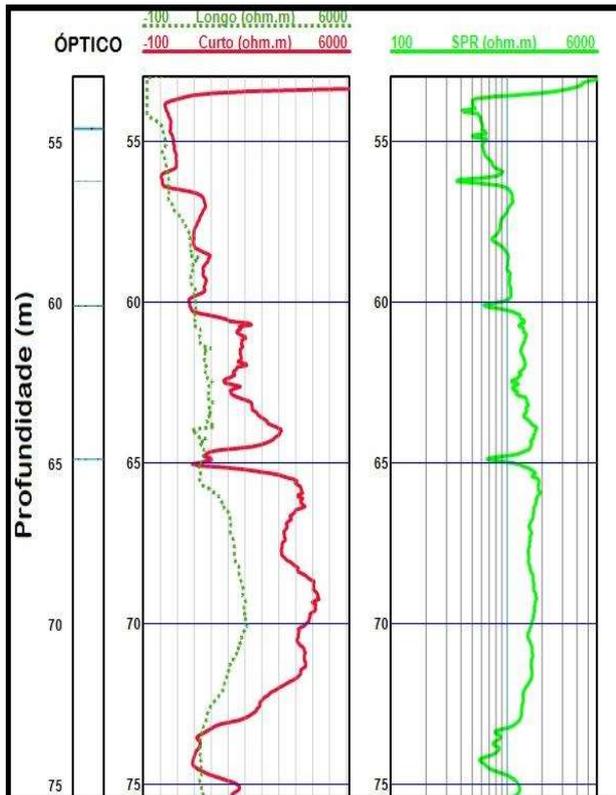


Figura 2 – Perfis com as principais fraturas definidas pelos resultados do imageamento óptico e curvas de resistividade obtidas pelas perfilações elétricas (espaçamentos longo e curto e SPR) do poço localizado no campus universitário.

A região na qual o poço possuía revestimento não é apresentada, pois como esperado não apresentou variação do sinal devido à ausência de contato entre os eletrodos na sonda e a formação impedindo assim a injeção de corrente no meio. Este resultado indica que a perfilação de resistividade pode ser utilizada como recurso em estudos para determinar os limites do revestimento em poços.

Onde o poço é aberto, ou seja, não revestido, as curvas de resistividade apresentam uma tendência de aumento nos valores com a profundidade entre 55 e 65 metros seguida de certa estabilidade até sofrer uma queda a partir da profundidade de 72 metros. Este comportamento aparece nos resultados obtidos pelos três diferentes arranjos utilizados, mas como é possível observar, existem variações pontuais que ficam evidentes somente nos perfis de resistividade normal com espaçamento curto e SPR.

Ao utilizar um espaçamento curto entre o eletrodo de corrente e potencial na perfilação normal de resistividade, o volume investigado é menor, porém as medições são mais sensíveis às variações que não podem ser detectadas pelo espaçamento mais longo. De forma semelhante, como o volume de investigação do método SPR é definido pelo diâmetro do eletrodo presente na sonda, a maior parte do sinal está sujeito às variações presentes próximas à parede do poço.

As presenças de picos nas curvas de resistividade indicando aumento da condutividade (inverso da resistividade) podem estar associadas com zonas nas quais ocorre entrada ou saída de água no poço, já que a presença do líquido auxilia a propagação de corrente elétrica no meio. Foram identificados oito deflexões nos perfis elétricos associados à presença de fraturas no poço nas profundidades de 54, 55, 56, 58, 60, 63, 65 e 74 metros.

Comparando com os resultados obtidos pela perfilação OBHTV, o número de zonas identificadas pela perfilação elétrica é bem menor, porém como este levantamento fornece informações sobre propriedades físicas da formação, é possível assumir que a maioria das fraturas apresentadas na Tabela 1 devem estar fechadas ou são resultados da perfuração do poço.

Todas as zonas fraturadas apresentadas na Tabela 2, cujas aberturas são da ordem de centímetros foram detectadas nas curvas de resistividade, sendo que o contrário não ocorreu válido já que existem zonas de baixa resistividade cujo imageamento óptico não identificou fraturas. Desta maneira, os métodos utilizados se complementam para definir quais as zonas fraturadas efetivamente estão associadas ao fluxo no poço.

Foram identificadas 33 fraturas ao longo do embasamento cristalino que tem comprimento total de 22,5 metros, resultando numa frequência linear de 1,46 fraturas por metro. De acordo com Zimmermann et al. (2005), é possível determinar o comprimento crítico das fraturas (l_c), ou seja, a extensão mínima das fraturas para atingir o limite de percolação, a partir da densidade linear de fraturas (λ_L) e do parâmetro de percolação (p). Assumindo uma distribuição aleatória das fraturas no poço, Bour e Davy (1997) fornecem um valor teórico de 5,6 para p e o comprimento pode ser determinado pela seguinte relação:

$$l_c = \frac{p}{\lambda_L} = 3,9m \quad (5)$$

Portanto, para que as fraturas presentes no poço ultrapassem o limite de percolação e contribuam para o fluxo ao longo da formação tenham um comprimento mínimo de 3,9 metros.

Conclusões

O estudo do fluxo de água em maciços cristalinos associado às fraturas é complexo, pois a formação não é um meio isotrópico. Desta maneira, o grau de detalhamento para descrever como ocorre o transporte em subsuperfície é diretamente proporcional à quantidade de informações obtidas em campo.

Os métodos geofísicos de perfilação utilizados (resistividade e imageamento óptico) apresentaram eficiência em localizar as principais zonas fraturadas presentes no poço. É necessário ressaltar que através destes resultados não foi possível identificar quais destas

zonas contribuem com o fluxo no poço, porém a correlação dos resultados obtidos pelos perfis permitiu determinar entre as diversas fraturas observadas quais possuíam maiores indícios em permitir o fluxo de água.

O método de perfilagem óptica também se mostrou eficaz para estudos nos quais se deseja observar a integridade da parede do poço tanto em zonas revestidas como abertas, enquanto as curvas de resistividade permitiram determinar somente os limites superior e inferior do revestimento.

Apesar da metodologia ter sido testada em apenas um poço, foi possível obter uma estimativa sobre o comprimento crítico para as fraturas atingirem o limite de percolação a partir da frequência linear ao longo do embasamento. Neste caso, uma zona fraturada deve ter, no mínimo, 3.9 metros de extensão para participar de uma rede de comunicação assumindo uma distribuição aleatória das fraturas.

Foram identificadas quatro zonas fraturadas com maior destaque pelos resultados das perfilagens em 56, 60, 65 e 74 metros de profundidade. Estudos adicionais destes intervalos, utilizando sondas de medida do fluxo vertical no interior do poço, estão programados para determinar parâmetros como transmissividade e carga hidráulica de cada zona permitindo construir um modelo discreto de fraturas que represente o fluxo na região.

Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo financiamento fornecido para o desenvolvimento deste trabalho. Agradecimentos adicionais ao Professor Doutor Chang Hung Kiang do Departamento de Geologia Aplicada da UNESP/Rio Claro e ao pesquisador Carlos Birelli do Instituto de Pesquisa Tecnológica da USP.

Referências

Boisson, A., Guihéneuf, N., Perrin, J., Bour, O., Dewandel, B., Dausse, A., Viossanges, M., Ahmed, S., Maréchal, J.C., 2015. Determining the vertical evolution of hydrodynamic parameters in weathered and fractured south Indian crystalline-rock aquifers: insights from a study on an instrumented site. *Hydrogeology Journal*, v.23(4): 757-773.

Bour, O., Davy, P., 1997. Connectivity of random fault networks following a power law fault length distribution. *Water Resources Research*, v. 33(7): 1567-1583.

Boutt, D.F., Diggins, P., Mabee, S., 2010. A field study (Massachusetts, USA) of the factors controlling the depth of groundwater flow systems in crystalline fractured-rock terrain. *Hydrogeology Journal*, v.18(8): 1839-1854.

Karasaki, K., Freifeld, B., Cohen, A., Grossbacher, K., Cook, P., Vasco, D., 2000. A multidisciplinary fractured rock characterization study at Raymond field site, Raymond, CA. *Journal of Hydrology*, v.236: 17-34.

Keys, W.S., 1990. Borehole geophysics applied to ground-water investigations, U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey.

Paillet, F., 2013. Cross-borehole flow profiling-delineating subsurface flow paths within a geophysically defined aquifer framework. *The Leading Edge*, v.32(7): 758-765.

Porsani, J.L., Borges, W.R., Elis, V.R., Diogo, L.A., Hiodo, F.Y., Marrano, A., Birelli, C.A., 2004. Investigações Geofísicas de Superfície e de Poço no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP, *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 22(3): 245-258.

Stumm, F., Chu, A., Joesten, P.K., Lane, J.W., 2007. Geohydrologic assessment of fractured crystalline bedrock on the southern part of Manhattan, New York, through the use of advanced borehole geophysical methods. *Journal of Geophysics and Engineering*, v. 4(3): 245-252.

Williams, J., Johnson, C., 2004. Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies. *Journal of Applied Geophysics*, v.55:151-159.

Zimmermann, G., Burkhardt, H., Engelhard, L., 2005. Scale dependence of hydraulic and structural parameters in fractured rocks, from borehole data (KTB and HSDP). Geological Society, London, Special Publications, v. 240(1): 37-45.