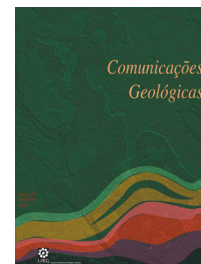


Modelação 3D da transmissividade do maciço granítico envolvente à antiga mina da Quinta do Bispo

3D modelling of the transmissivity of granitic rocks surrounding the old Quinta do Bispo mine

S. Barbosa^{1*}, J. A. Almeida¹, A. Chambel²



Artigo Curto
Short Article

© 2014 LNEG – Laboratório Nacional de Geologia e Energia IP

Resumo: Apresenta-se uma metodologia para caracterizar a transmissividade dos Granitos Hercínicos e Metasedimentos do Complexo Xisto-Grauváquico do maciço envolvente e subjacente à antiga área mineira de urânio da Quinta do Bispo. Inicia-se com a modelação das litologias e grau de alteração a que se segue a simulação condicional da densidade de fracturação. No final, a densidade de fracturação é convertida num modelo 3D de transmissividade por relação com os resultados dos ensaios de bombagem.

Palavras-chave: Maciço granítico, Modelo geológico 3D, Transmissividade em meios fraturados, Modelação de fraturas, Simulação.

Abstract: The purpose of this work is to present a methodology for characterizing the transmissivity of the Hercynian granites and complex schist–greywacke metasediment rocks surrounding and underlying the old Quinta do Bispo uranium mining site. The methodology encompasses modelling of lithologies and weathering levels, followed by a conditional simulation of fracture density. Fracture density is then converted into a 3D model of transmissivity via a relationship with pumping tests.

Keywords: Granitic rocks, 3D geological model, Transmissivity of fractured rocks, Modelling of fractures, Simulation.

¹CICEGe, Departamento de Ciências da Terra, FCT-Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, Portugal.

²Departamento de Geociências/Universidade de Évora, 7004-516 Évora, Portugal.

*Autor correspondente / Corresponding author: svtb@fct.unl.pt

1. Introdução

Num sistema aquífero fraturado, o fluxo da água ocorre maioritariamente pelo sistema de descontinuidades ao invés dos poros (Fialho *et al.*, 1998; Chambel, 2006). As descontinuidades ocorrem em todas as escalas, desde as de grandes dimensões com dezenas de metros de comprimento (observáveis em imagens de fotografia aérea e afloramentos) até às métricas (observadas nas carotes) e centimétricas ou menos. Esta replicação, a todas as escalas, torna a caracterização dos sistemas fraturados um tópico complexo e de investigação.

Neste trabalho propõe-se uma metodologia para a construção de um modelo 3D da geologia e respetivos atributos hidrogeológicos para meios rochosos fraturados.

O caso de estudo é o maciço subjacente e envolvente à antiga mina da Quinta do Bispo, localizada no concelho de Mangualde (Matos-Dias & Costa, 1972; Barbosa, 2013). Até próximo do final do século XX, foi explorado um encrave de metassedimentos com mineralizações de urânio disseminadas e *stockwork*. As litologias dominantes são Granitos Hercínicos e Metasedimentos do Complexo Xisto-Grauváquico, ocorrendo ainda, a montante, depósitos arcósicos e, a jusante, depósitos aluvionares. O comportamento hidrogeológico é condicionado por acidentes estruturais importantes e relacionáveis com os fenómenos de mineralização. O modelo conceptual da transmissividade, para um sistema fraturado e heterogéneo como é caso, evidencia pequenos corpos de alta transmissividade inseridos numa massa rochosa de transmissividade média a baixa.

Esta antiga área mineira tem sido monitorizada no âmbito da “*Concessão para a Recuperação Ambiental de Áreas Mineiras Degradadas*” (Decreto-Lei 198/A de 6 de Julho de 2001) desde 2002. A enorme quantidade de informação disponível, e a problemática relacionada com as antigas minas de urânio, tornam este local especialmente interessante com vista à construção de modelos de escoamento segundo níveis de confiança minimamente aceitáveis (Pereira *et al.*, 2004, 2005).

2. Metodologia

A construção de um modelo hidrogeológico para um meio heterogéneo e fraturado inicia-se com a caracterização da distribuição espacial das litologias e dos atributos que condicionam o escoamento, tais como, o grau de alteração e fracturação. As metodologias mais adequadas são as que envolvem simulação geoestatística, porque têm em conta as estatísticas de continuidade espacial e simultaneamente geram vários cenários equiprováveis (Almeida, 2010; Quntal *et al.*, 2012).

Considerando estes requisitos gerais, é proposta uma metodologia para gerar um modelo da transmissividade deste maciço granítico, caracterizado por alteração e fracturação heterogéneas, que contacta uma antiga exploração a céu aberto de minérios de urânio (Barbosa,

2013). Da informação de partida selecionaram-se os atributos Litologia, Alteração, Limonitização e Densidade de fracturação. Estas propriedades dizem respeito às características da matriz rochosa e das fraturas que influenciam, direta ou indiretamente, as propriedades hidráulicas do meio. A metodologia desenvolveu-se nas seguintes etapas:

- 1) Organização e análise da vasta informação disponível sobre o local de estudo;
- 2) Pré-processamento e codificação da informação de partida relativa às litologias, alteração, limonitização e fracturação observadas nas imagens dos testemunhos de sondagens;
- 3) Análise estatística preliminar das dependências entre estes atributos;
- 4) Inicialização de uma malha de blocos com 5m x 5m x 5m cada;
- 5) Construção do modelo geológico 3D dos atributos litologias, alteração e limonitização na malha de blocos. Estas variáveis foram trabalhadas como categóricas tendo sido modeladas por Simulação Sequencial da Indicatriz (SSI) numa versão paralelizada do *software* (Nunes & Almeida, 2010). As variáveis foram simuladas à vez, primeiro a litologia, depois a alteração condicionada às litologias e, posteriormente, a limonitização às anteriores.
- 6) Conversão da variável número de fraturas por metro linear de sondagem em número de fraturas por unidade de volume (programa FTRIAN, Almeida & Barbosa, 2008), e modelação 3D desta variável por simulação Sequencial Direta (SSD) (Soares, 2001, Soares *et al.*, 2006);
- 7) Análise e interpretação dos ensaios de bombagem (Barbosa, 2013);

- 8) Geração do modelo 3D de transmissividade equivalente para o local.

3. Caso de Estudo

3.1. Construção do modelo geológico 3D das litologias, alteração e limonitização

Para a variável litologia foram testadas 11 classificações tendo-se optado por uma com seis designações: granito porfiróide, granito biotítico, micaxisto, migmatito e granito brechificado. A cartografia geológica do local à escala 1:5.000 (Matos-Dias & Costa, 1972) e os dados das sondagens mostram que as litologias dominantes, granito porfiróide e biotítico, ocorrem em proporções não estacionárias, a Norte predominam os granitos porfiróides e a Sul os biotíticos. Para condicionar o modelo às proporções locais das litologias, o volume em estudo foi subdividido em duas regiões. Foram simuladas 20 realizações das litologias e calculada a imagem média (Fig. 1a).

A alteração foi trabalhada com as modalidades W1, W2, W3 e W4, respetivamente do grau menos para o mais alterado (ISRM, 2007). Verificadas as dependências existentes, a modelação da alteração foi condicionada às proporções observadas nas litologias mais duas classes de profundidade (abaixo ou acima de 15 metros). Para cada uma das 20 imagens de litologias foram geradas cinco da alteração, de que resultaram 100 imagens simuladas. Também foi calculada a imagem média das classes de alteração de que se representam W3 e W4 na figura 1b.

A limonitização foi modelada como binária, ou seja, se existe ou não limonite. Ao longo do estudo, verificou-se não existir correlação com a intensidade de fracturação, pelo que esta variável não foi utilizada nas fases seguintes.

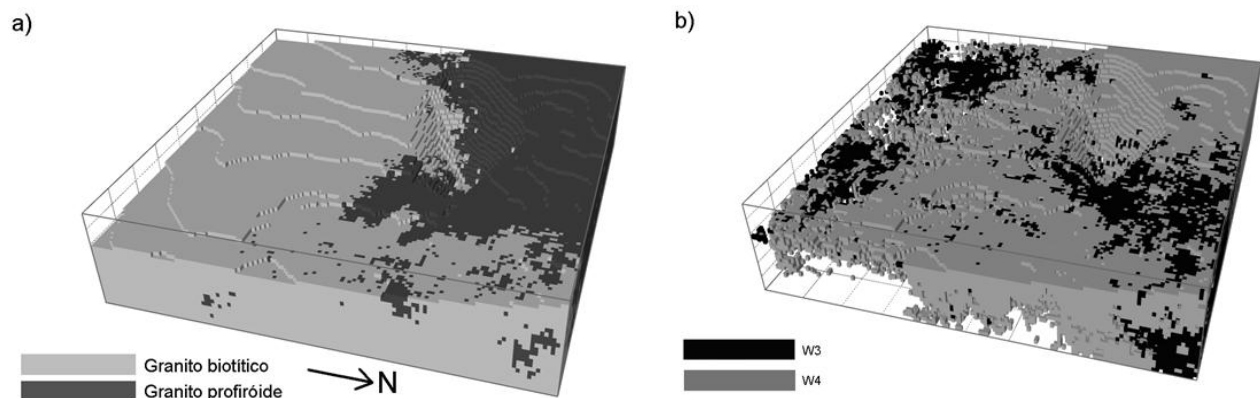


Fig. 1. (a) Visualização 3D da imagem média das litologias granito porfiróide e granito biotítico. (b) visualização 3D da imagem média das classes de alteração W3 e W4.

Fig. 1. (a) 3D view of the average image of porphyritic granite and biotitic granite. (b) 3D view of the average image of weathering classes W3 and W4.

3.2. Construção do modelo geológico 3D da fracturação

Esta fase compreendeu o pré-processamento e codificação da informação de partida da fracturação, seguindo-se a construção do respetivo modelo 3D por simulação geoestatística da variável *Número de fraturas* por unidade de volume. A questão fundamental foi transformar a medição 1D (número de fraturas identificadas num troço de sondagem) numa medição 3D que é o número de fraturas por unidade de volume. As fraturas preenchidas foram excluídas das contagens porque se pressupôs que numa fratura preenchida não há escoamento pelo que é como se não existisse.

As sondagens disponíveis são todas verticais, pelo que o estabelecimento de famílias de fraturas é limitado. As medições da densidade linear de fracturação a partir das sondagens mostraram equilíbrio nas proporções entre as fraturas das três classes de inclinação identificadas pelo que optou-se por não separar as fraturas por famílias.

A aplicação do programa FTRIAN gerou uma tabela de correspondências entre o número de fraturas por metro linear de fratura (1D) e o equivalente número de fraturas por unidade de volume (3D). Estes valores são a informação de partida nos blocos intersectados por sondagens para a SSD.

Como é pretendido que o modelo do número de fraturas seja condicional às litologias e grau de alteração e, indiretamente, a profundidade, a SSD utilizou o condicionamento a histogramas e médias locais que resultaram do cruzamento das seis litologias com os graus de alteração, exceto o W4, porque se admitiu que o escoamento em rocha muito alterada não é feito pela rede de fraturas. Para cada imagem da variável alteração foram geradas três realizações do número de fraturas, totalizando 300 cenários.

3.3. Análise e interpretação de ensaios de bombagem

Da interpretação de ensaios de bombagem foram quantificadas a transmissividade e o coeficiente de armazenamento do meio. Efetuaram-se comparações entre resultados dos ensaios pelos métodos de “Theis com correção de Jacob” e “porosidade dupla”. A análise identificou duas unidades hidráulicas:

a) Uma, sediada na área dos granitos de grão grosseiro, porfiróides, por vezes com intercalações pegmatíticas, onde os efeitos de argilização e sericitização do maciço induzem um funcionamento predominante por porosidade;

b) Outra, sediada na área dos granitos cinzentos, de grão grosseiro a médio, maioritariamente biotíticos, que funciona essencialmente por fracturação. Exibe velocidades de escoamento, pelo menos nas primeiras fases de ensaio, mais rápidas e maior facilidade na cedência de água. É também mais heterogénea e com perpetuação de escoamentos a maiores distâncias, sendo condicionada pela intersecção com outras estruturas que possam ser fonte de alimentação, tais como zonas de brecha ou filões com quartzo.

Foi possível correlacionar valores de transmissividade que variam desde mínimos na ordem dos 0,01 m²/dia, a máximos na ordem dos de 400 a 500 m²/dia, de acordo com a litologia e grau de alteração.

3.4. Modelo 3D de transmissividade equivalente

Cruzaram-se os resultados da interpretação dos ensaios de bombagem (Pereira & Almeida, 1997), expressos sob a forma de histogramas condicionais de transmissividade, por litologia e por grau de alteração (W1, W2, W3 e W4), com os modelos da densidade de fracturação condicionais às litologias e grau alteração (Fig. 2b). O modelo final de transmissividade resultou do estabelecimento de uma relação entre os histogramas da densidade de fracturação dos modelos e os histogramas de transmissividade dos ensaios. Para o grau de alteração mais elevado W4, como não foram simuladas a densidade de fraturas, a geração da transmissividade equivalente foi feita por simulação geoestatística condicional aos ensaios de bombagem.

Ao todo foram gerados 300 cenários equiprováveis de transmissividade que refletem, a 3D, as heterogeneidades laterais e em profundidade (Fig. 3).

4. Conclusões

A metodologia proposta foi desenvolvida e orientada por um caso de estudo. Tem uma arquitetura inovadora, que possibilita a representação espacial da heterogeneidade de propriedades intrínsecas e estruturais de maciços fracturados, que influenciam o escoamento da água subterrânea. O modelo final de transmissividade a 3D é condicional às variáveis intervenientes no modelo geológico Litologia, Alteração e Densidade de fracturação e aos resultados dos ensaios de bombagem.

O maciço estudado confirma-se ser bastante heterogéneo, composto por corpos de alta transmissividade, com efeitos de barreira, ligados entre si por zonas de dimensão e localização restrita que possibilitarão a perpetuação tortuosa dos escoamentos.

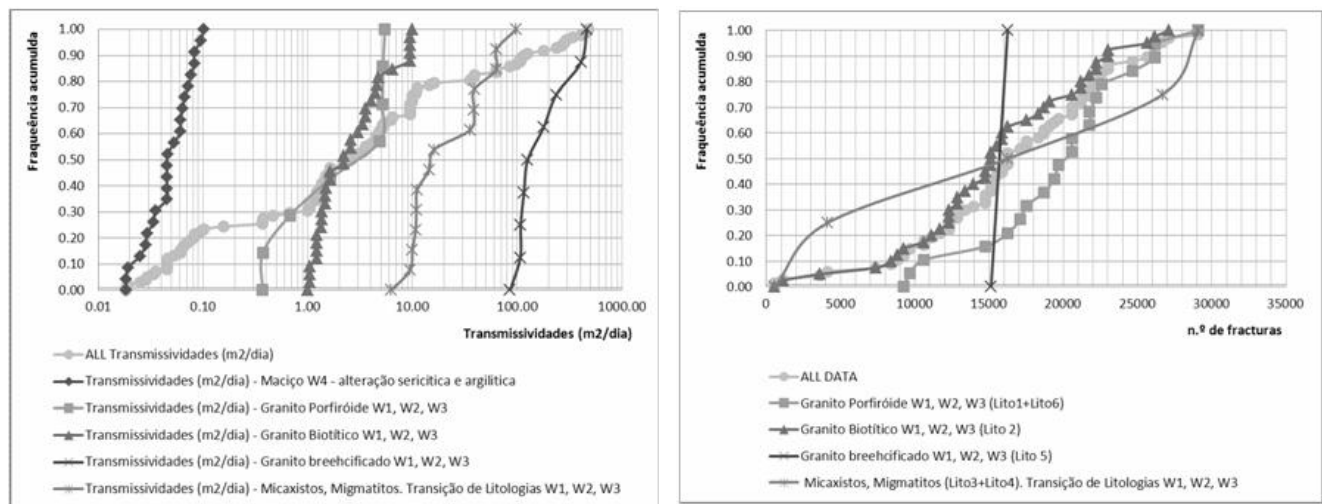


Fig. 2. (a) Frequências acumuladas dos resultados de transmissividade selecionados e possíveis interpretações em termos das litologias e graus de alteração. (b) Relação entre o número de fraturas e as litologias e os graus de alteração.

Fig. 2. (a) Cumulative frequencies of selected transmissivity results and possible interpretations in terms of lithologies and degrees of weathering. (b) Relationship between the number of fractures, lithology, and degree of weathering.

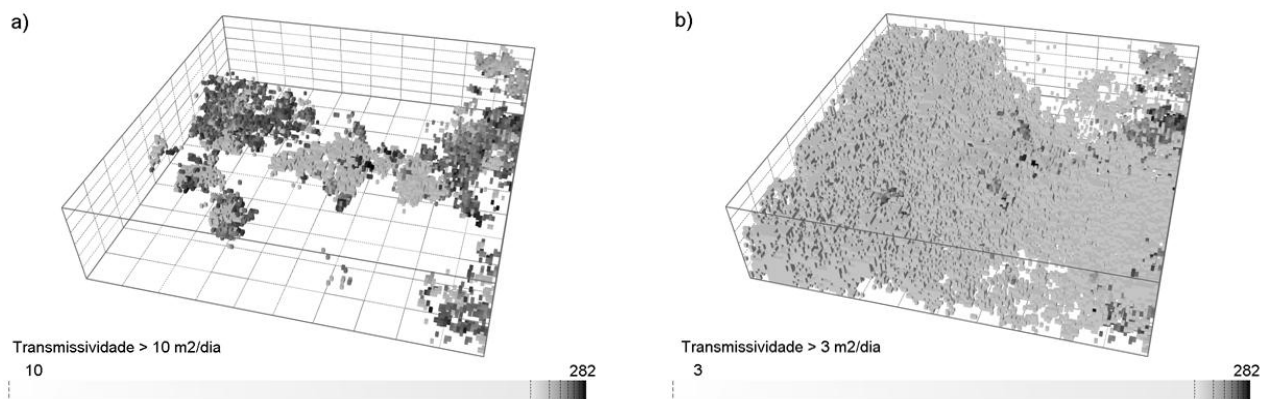


Fig. 3. Visualização 3D de uma realização de transmissividade em escala logarítmica onde (a) mostram-se as regiões acima de 10 m²/dia e (b) acima de 3 m²/dia.

Fig. 3. 3D view of one image of transmissivity using a logarithmic scale (a) greater than 10 m²/day and (b) greater than 3 m²/day.

Referências

- Almeida, J.A., 2010. Stochastic simulation methods for characterization of lithoclasses in carbonate reservoirs. *Earth-Science Reviews*, **101**, 250–270.
- Almeida, J.A., Barbosa, S., 2008. 3D Stochastic Simulation of Fracture Networks Conditioned Both to Field Observations and a Linear Fracture Density. In: J.M. Ortiz, X. Emery, (Eds). *Proceedings of the Eighth International Geostatistics Congress*, Santiago do Chile, vol. I, 129–136.
- Barbosa, S., 2013. *Modelação de atributos hidrogeológicos do maciço envolvente à antiga área mineira da Quinta do Bispo*. Tese de doutoramento, Universidade Nova de Lisboa (não publicada), 168 p.
- Chambel, A., 2006. *Proceedings of the 2nd workshop of the IAH Iberian Regional working group on hard rock hydrogeology*. Universidade de Évora, 247 p.
- Decreto-Lei 198/A de 6 de Julho de 2001. *Regime Jurídico de Concessão do Exercício da Actividade de Recuperação Ambiental das Áreas Mineiras Degradadas*.
- Fialho, A., Chambel, A., Almeida, C. 1998. Caracterização Hidráulica de Aquíferos Fracturados por Modelos de Porosidade Dupla no Concelho de Évora. *Atas do 4.º Congresso da Água*, 12 p.
- ISRM, 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006. In: R. Ulusay, J.A. Hudson, (Eds). *Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics*. 628 p.
- Matos-Dias, J.M., Costa, C.V.B., 1972. A região uranífera da Cunha Baixa-Quinta do Bispo. *Memórias e Notícias, Publicações do Museu e Laboratório de Mineralogia*. Universidade de Coimbra, 24 p.

- Nunes, R., Almeida, J.A., 2010. Parallelization of sequential Gaussian, indicator and direct simulation algorithms. *Computers & Geosciences*, **36**, 1042–1052.
- Pereira, A.J.S.C., Neves, L.J.P.F., Dias, J.M.M., Barbosa, S.V.T., 2004. Evaluation of radionuclide contamination in the vicinity of the Cunha Baixa and Quinta do Bispo old uranium mines (Central Portugal). *Radioproteção*, **II(4-5)**, 103–117.
- Pereira, A.J.S.C., Neves, L.J.P.F., Dias, J.M.M., Barbosa, S.V.T., 2005. Environmental hazards at Urgeiriça and Cunha Baixa-Quinta do Bispo old uranium mines. *International Atomic Energy Agency, Proceedings Series 400, Environmental contamination from uranium production facilities and their remediation*, 181–191.
- Pereira, M.R., Almeida, C., 1997. Interpretação de ensaios de caudal de aquíferos fracturados em Trás-os-Montes Oriental (Portugal) por modelos de porosidade dupla e por métodos clássicos. In: J.G. Yélamos, F. Villaroya, (Eds). *Hydrogeology of Hard Rocks, Some experiences from Iberian Peninsula and Bohemian Massif*, Madrid, 15–29.
- Quental, P., Almeida, J.A., Simões, M., 2012. Construction of high-resolution stochastic geological models and optimal upscaling to a simplified layer-type hydrogeological model. *Advances in Water Resources*, **39**, 18–32.
- Soares, A., 2001. Direct Sequential Simulation and Cosimulation. *Mathematical Geosciences*, **33**, 911–926.
- Soares, A., Almeida, J.A., Guerreiro, L., 2006. Incorporating secondary information using direct sequential cosimulation. In: T.C. Coburn, J.M. Yarus, R.L. Chambers, (Eds). *Stochastic modeling and geostatistics: Principles, methods, and case studies. Vol. II, AAPG Computer Applications in Geology*, **5**, 35-43.