



SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA DA TRANSMISSIVIDADE EM FORMAÇÕES GRANÍTICAS ALTERADAS E FRACTURADAS

Sofia BARBOSA¹, José António ALMEIDA², António CHAMBEL³

1. Departamento de Ciências da Terra e GeoBioTec, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, svib@fct.unl.pt
2. Departamento de Ciências da Terra e GeoBioTec, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, ja@fct.unl.pt
3. Departamento de Geociências, Universidade de Évora, Instituto de Ciências da Terra (ICT), Pólo da Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, 7000-671 Évora, Portugal, achambel@uevora.pt

RESUMO

Considerando como caso de estudo o do maciço envolvente e subjacente à antiga mina de urânio de Quinta do Bispo (Concelho de Mangualde), composto essencialmente por granitos hercínicos e metasedimentos do Complexo Xisto-Grauváquico, estabeleceu-se uma metodologia que permitiu a construção de modelos 3D de transmissividade, equiprováveis, mediante o cruzamento de propriedades intrínsecas do maciço rochoso – neste caso particular, a litologia, o grau de alteração e a densidade de fracturação - passíveis de modelação estocástica a 3D, com propriedades hidrogeológicas do meio, medidas *in situ* e avaliadas deterministicamente, por via da realização e interpretação de ensaios de bombagem direccionados. A interpretação dos resultados dos ensaios de bombagem realizou-se por patamares, recorrendo-se aos métodos de “Porosidade Dupla” e de “Theis com correcção de Jacob”, tendo-se processado curvas cumulativas de valores de transmissividade em função da litologia e do grau de alteração, conforme os distintos sectores comportamentais do maciço. A metodologia adoptada levou a que os valores de transmissividade de cada célula dos modelos 3D tenham sido simulados com condicionamento aos valores experimentais dos ensaios de bombagem, ponderados de acordo com as probabilidades dessa mesma célula representar, numa dada localização no espaço, uma certa Litologia, sob um determinado Grau de Alteração que possui, quando aplicável, um certo Número de Fracturas não preenchidas. As variáveis representativas dos atributos geológicos Litologia, Grau de Alteração e Número de Fracturas, foram simuladas em cadeia pelo que os modelos de transmissividades integram a variabilidade e heterogeneidade locais destes atributos, os quais condicionam o fluxo tridimensional da água.

Palavras-Chave: Maciços heterogéneos fracturados; modelação geológica 3D; modelos de fracturas; modelos de porosidade dupla; simulação 3D de transmissividades

1. INTRODUÇÃO

A modelação geológica e hidrogeológica de maciços heterogéneos, fracturados e alterados (Paradela e Zbyszewski, 1971; Chambel, 2006) constitui uma linha de investigação emergente no que respeita às abordagens algorítmicas e ao estabelecimento de metodologias integradas, orientadas pelo caso de estudo. A aplicação exclusiva de técnicas de ensaio e métodos de tratamento designados por convencionais ou deterministas, tipicamente definidos e estabelecidos para meios porosos, podem resultar em conclusões ilusórias ou em resultados de modelação hidrogeológica enviesados e, portanto, pouco representativos da realidade (S. Barbosa, 2013).

A metodologia desenvolvida concilia técnicas e algoritmos convencionais com uma nova abordagem para o estabelecimento da transmissividade equivalente, resultando, no seu todo, numa abordagem inovadora e multidisciplinar. Esta metodologia permitiu a geração de modelos equiprováveis 3D de transmissividades de um maciço dotado de elevada heterogeneidade, composto no seu essencial por granitos hercínicos e metasedimentos do Complexo Xisto-Grauváquico, com vários graus de alteração e de fracturação, a que se associa a complexidade acrescida que advém dos efeitos de alteração hidrotermal e supergénica, devidos a fenómenos de mineralização (Matos-Dias e Costa, 1972), uma vez que se considerou como caso de aplicação o de um maciço envolvente a uma antiga área mineira, relacionada com a exploração no século passado de minérios de urânio no Concelho de Mangualde (Quinta do Bispo).



10.º Seminário sobre Águas Subterrâneas

Évora, 9 e 10 de abril de 2015 | Universidade de Évora

2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO DO CASO DE ESTUDO

A área em estudo enquadra-se na região uranífera da Cunha Baixa e Quinta do Bispo. Nesta região ocorrem em abundância retalhos de micaxistos do Complexo Xisto-Grauváquico, ante-ordovícicos, que sofreram metassomatismo, por vezes, intenso (J.E.N., 1968; Ferreira, 1971). Um pórfiro granítico com direcção E-W, com frequentes rejeitos e possanças que podem alcançar os três metros ocorre na área, a Norte, verificando-se, igualmente, a existência de depósitos terciários de natureza arcósico-terrigena. Na envolvente à área mineira predominam os granitos da série hercínica, monzoníticos, de duas micas, de grão médio a grosseiro, sendo frequente a tendência para o profiroidismo, em particular junto a zonas de contacto com estruturas mineralizadas e enclaves de micaxistos. A granularidade destes granitos pode variar em profundidade, o que pressupõe uma localização mais periférica, na fronteira de uma estrutura batolítica, ou que os materiais de natureza granítica terão sido sujeitos à acção de um magma muito fluido que terá intruído lateralmente nas formações.

3. METODOLOGIA ADOPTADA

A metodologia desenvolvida e adoptada ao caso de estudo, compõe-se pelas seguintes quatro fases principais:

- **Fase 1, Construção do modelo geológico 3D das variáveis “litologia”, “alteração” e “limonitização”,** com construção dos respectivos modelos 3D por simulação geoestatística numa malha de blocos com recurso ao algoritmo da SSI (Simulação Sequencial da Indicatriz), verificando-se previamente as interdependências existentes
- **Fase 2, Construção do modelo geológico 3D da fracturação,** com a simulação geoestatística da variável *Número de fracturas* por unidade de volume, numa malha de blocos, recorrendo-se ao algoritmo da SSD (Simulação Sequencial Directa) com histogramas e médias locais; a conversão da densidade linear de fracturação (DLF 1D) no *Número de Fracturas* 3D foi condicionada às litologias e graus de alteração e efectuou-se com recurso ao modelo por objectos FTRIAN, algoritmo de simulação de fracturas desenvolvido pelo ex-CICEGe (FCT-UNL) que permite a geração computacional de redes de fracturação aproximadas a polígonos simples (triângulos, quadrados ou malhas de triângulos) num volume de referência e condicionado a uma densidade linear de fracturação (Almeida & Barbosa, 2008).
- **Fase 3, Análise e interpretação de ensaios de bombagem,** em que foram quantificadas a transmissividade e o coeficiente de armazenamento do meio, considerando-se as características inerentes a cada ensaio de bombagem e as possíveis interpretações nas diferenças de resultados encontradas; a interpretação dos resultados dos ensaios de bombagem realizou-se por patamares, que à partida representarão diferenças de comportamento hidráulico que advêm de diferentes sectores presentes no meio, recorrendo-se aos métodos de ajustamento de curvas de “Porosidade Dupla” e de “Theis com correcção de Jacob”. Obtiveram-se curvas cumulativas de transmissividade em função da litologia e do grau de alteração utilizadas na fase subsequente de cruzamento de histogramas (Figura 1)
- **Fase 4, Modelo 3D de transmissividade equivalente,** fase final e determinante na inovação metodológica adoptada, em que se cruzaram os resultados da interpretação dos ensaios de bombagem, expressos sob a forma de histogramas condicionais de transmissividade por litologia e por grau de alteração (W1, W2, W3 e W4), com os modelos 3D das litologias, alteração e densidade de fracturação. O resultado é um modelo de transmissividade, condicionado a toda a informação principal interveniente no estudo. A Figura 1 detalha esta fase e a interacção com os atributos anteriores. A excepção foi o grau de alteração mais elevado (W5) onde, por não terem sido simulados o número de fracturas, os valores foram gerados só a partir da curva cumulativa de transmissividade por simulação de campos de probabilidade (*PFS, Probability Field Simulation*). O modelo final de transmissividade é, assim, condicional às variáveis intervenientes no modelo de atributos geológicos, porque estas variáveis são simuladas em cadeia, e aos ensaios de bombagem. Integra a variabilidade e heterogeneidade locais destes atributos, os quais condicionam o fluxo tridimensional da água (Figura 2).

4. RESULTADOS ALCANÇADOS

Com a metodologia adoptada foi possível gerar modelos 3D das transmissividades de um meio rochoso, heterogéneo, alterado e fracturado, na dependência, em simultâneo, de resultados de ensaios de bombagem que foram cruzados com resultados de modelação espacial de variáveis representativas de atributos geológicos locais que condicionam o modo de perpetuação dos fluxos tridimensionais da água. Deste cruzamento resultaram, assim, matrizes, aptas para utilização em modelos de escoamento, que reflectem a variabilidade e heterogeneidade local do tipo de maciço estudado.

Os resultados obtidos mostram um modelo com muitas zonas pequenas caracterizadas por altas transmissividades, pelo que é de esperar que os escoamentos ocorrerão precisamente através desses pequenos volumes, e apenas, em



alguns casos específicos, através de ligações muito restritas, definidas especialmente pela presença de certas litologias e estruturas específicas, como filões de quartzo esmagado e/ou bastante fracturado ou brechas graníticas, e/ou por uma matriz rochosa que localmente apresente altos índices de fracturação. É muito provável que estas fracturas se encontrem pouco preenchidas, e terão, necessariamente, de apresentar um significativo grau de conectividade entre si para que possam apresentar maior capacidade de escoamento.

A melhor percepção das imagens 3D de valores de transmissividade é obtida quando se utiliza uma escala logarítmica, o que se coaduna com os resultados obtidos da interpretação dos ensaios de bombagem, igualmente representados sob este tipo de escalas, quando comparamos valores característicos de diferentes litologias e condições de fracturação. Estes resultados podem variar desde mínimos na ordem dos 0,01 m²/dia a máximos, extremos, na ordem dos 400 a 500 m²/dia. Aspectos relevantes da heterogeneidade deste meio, como os efeitos de barreira ou efeitos de maior perpetuação de escoamentos, encontram-se expressos nos modelos de transmissividade, pois constituíram informação condicional fundamental para a construção dos modelos 3D.

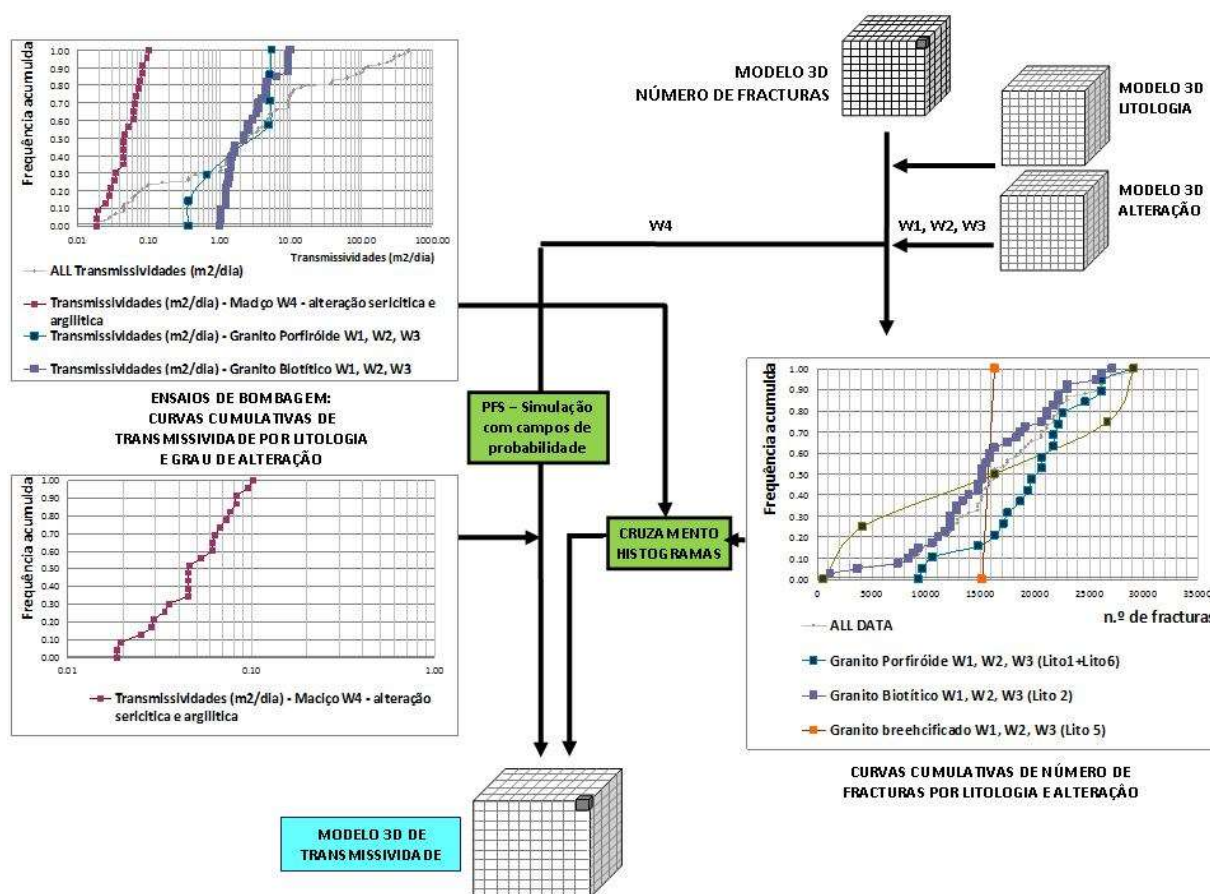


Figura 1. Fluxograma da fase 4 para a geração do modelo 3D de transmissividades, com cruzamento de histogramas



10.º Seminário sobre Águas Subterrâneas

Évora, 9 e 10 de abril de 2015 | Universidade de Évora

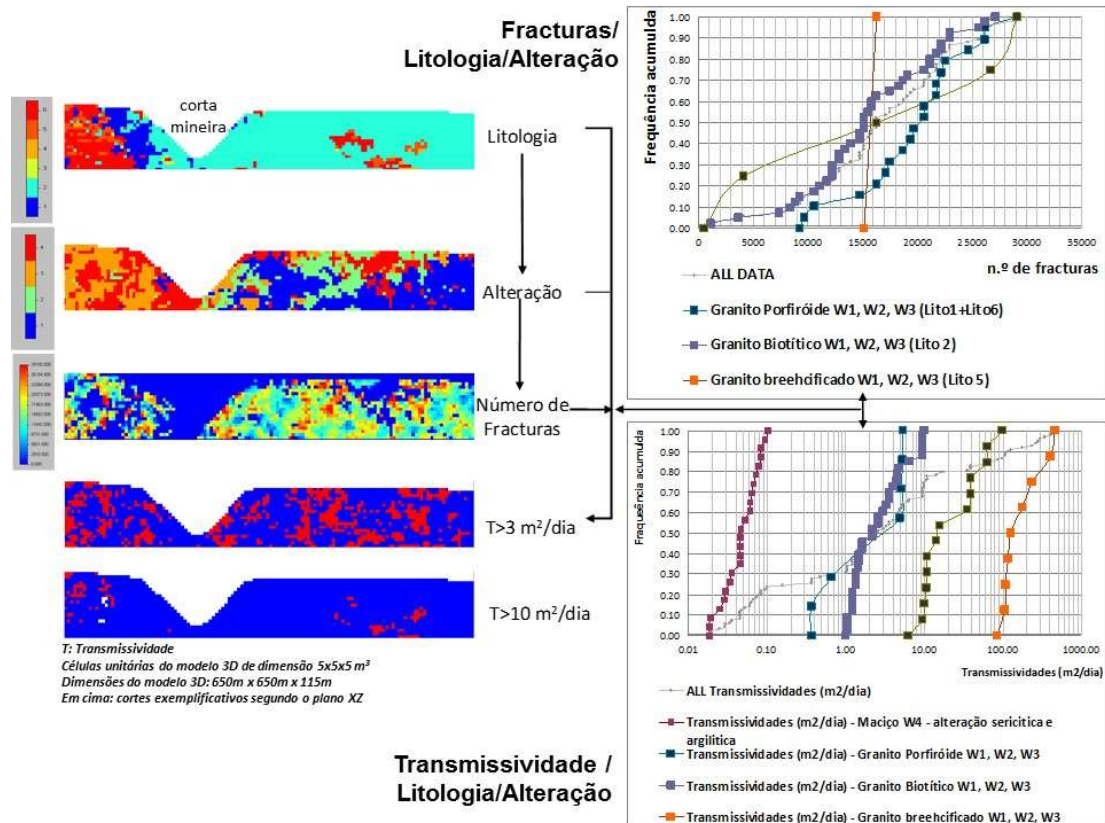


Figura 2. Síntese da sequência procedimental acompanhada de exemplo de resultados dos modelos 3D gerados

AGRADECIMENTOS

Os resultados apresentados integram uma Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Geológica, agradecendo-se os apoios para este efeito prestados ao autor pelos representantes dos Conselhos de Administração da EDM S.A entre os anos 2008 e 2012.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, JA e Barbosa, S (2008) 3D Stochastic Simulation of Fracture Networks Conditioned Both to Field Observations and a Linear Fracture Density. Proceedings of the Eighth International Geostatistics Congress. Santiago, Chile, vol.I, 8 p.
- Barbosa, S (2013) Modelação de atributos hidrogeológicos do maciço envolvente à antiga área mineira da Quinta do Bispo. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Geológica, FCT-UNL, Monte da Caparica, 171 p.
- Chambel, A (2006) Edit., Proceedings of the 2nd Workshop of the IAH Iberian Regional Working Group on Hard Rock Hydrogeology. AIH-GP International Association of Hydrogeologists - Portuguese Chapter and IAH - Commission on Hard Rock Hydrogeology - Iberian Regional Working Group., Évora, Portugal, 247 p.
- EXMIN (2001) Estudo director de áreas dos minérios radioactivos. 1^a Fase. Excerto do Vol. 2 – Área Mineira da Cunha Baixa e Quinta do Bispo. 25p.
- Ferreira, MPV (1971) Jazigos uraníferos portugueses. Jazigos de Au-Ag-sulfuretos do Norte de Portugal. Livro-Guia da Excursão n.º5. I Congresso hispano-Luso-Americano de Geologia Económica. Direcção-Geral de Minas e Serviços Geológicos. Lisboa. 81 p.
- J.E.N. (1968) A Província uranífera do Centro de Portugal. Suas características estruturais, tectónicas e metalogenéticas. Junta de Energia Nuclear. Lisboa.
- Matos-Dias, JM e Costa, CVB (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.
- Paradela, PL e Zbyszewski, G (1971) Hidrogeologia geral do Centro e Sul de Portugal. Livro-Guia da Excursão n.º9. I Congresso hispano-Luso-Americano de Geologia Económica. Direcção-Geral de Minas e Serviços Geológicos. Lisboa. 123 p.