

MODELO CONCEITUAL DA CONECTIVIDADE AQUÍFERO FRATURADO-AQUÍFERO SEDIMENTAR EM AMBIENTE SUBTERRÂNEO CONSTRUIDO

CONCEPTUAL MODEL OF SEDIMENTARY AND FRACTURED
AQUIFER CONNECTIVITY IN BUILT UNDERGROUND ENVIRONMENT

MALVA ANDREA MANCUSO
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM,
Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul, Brasil
E-mail: malvamancuso@ufsm.br

RESUMO ABSTRACT

A elaboração do modelo conceitual de conectividade hidráulica dos aquíferos sedimentar e fraturado no Vale de Alcântara, localizado às margens do Rio Tejo (Lisboa, Portugal), teve por objetivo compreender as relações e comportamentos hidráulicos entre o aquífero aluvionar e os calcários e basaltos fraturados. O estudo foi desenvolvido para apoio à construção do túnel de Alcântara. Nesse sentido, foi realizada a análise de resultados de ensaios de permeabilidade para fins de caracterização da condutividade hidráulica dos aquíferos, assim como a análise do grau de fraturação e alteração das rochas. A análise da relação hidráulica entre os aquíferos de porosidade granular e o maciço subjacente, foi realizada com base nos registos dos níveis de água de 33 piezômetros multiníveis. Os resultados dos ensaios de LeFranc indicaram K de 17,19 m/d a 0,01 m/d, em relação aos ensaios Triaxial, os intervalos de K_z oscilam entre 0,76 m/d e $3,43 \times 10^{-07}$ m/d. O Complexo vulcânico de Lisboa, Calcários e Margas apresentaram predomínio de rocha medianamente alterada a rocha decomposta, com espaçamento entre as fraturas de Medianamente afastado a Muito próximo. Os resultados dos ensaios de Lugeon, realizados nessas formações, indicaram K máximo de 0,8 m/d no basalto, 0,65 m/d nas Margas e 2,32 m/d nos Calcários. Segundo os dados de piezometria observam-se, em geral, que as cargas hidráulicas no maciço fraturado são superiores às do aluvião, indicando, possibilidade de fluxos ascendentes dos sistemas fraturados em relação ao sedimentar. Há indícios da influência dos níveis do rio Tejo na hidrodinâmica desses sistemas.

Palavras-chave: Conectividade hidráulica, aquífero sedimentar, aquífero fraturado, túnel, Lisboa.

To understand the hydraulic between the alluvial aquifer and the fractured rocks it was develop the hydrogeological conceptual model of Alcantara Valley. The area is located on Tagus river bank (Lisbon, Portugal). The study was developed to support the construction of the Alcantara tunnel. The hydraulic conductivity of the aquifers were define base on permeability tests. Permeability tests were done to obtain the hydraulic conductivity of the aquifers. Also, the study included data from fracturing tests and degree of rocks degradation. The study of the hydraulic relationship between the aquifers was based on water levels records from 33 multilevel piezometers. The LeFranc test results indicated K ranging from 17.19 to 0.01 m/d, Triaxial tests indicated K_z intervals from 0.76 to 3.43×10^{-07} m/d. The tests on Volcanic Complex of Lisbon, Limestone and Marl showed moderately rock degradation, with moderate to very next spacing between fractures. Lugeon tests indicated up to 0.8 m/d of K in volcanic rock, 0.65 m/d in Marl and 2.32 m/d in limestone. According to the piezometric data, the hydraulic levels of the fractured rocks are higher than the observed on the sedimentary aquifer, indicating the possibility of vertical upward movement of groundwater. There are evidences of water levels influence from Tagus River to the hydrodynamic of the system.

Keywords: Hydraulic connectivity, sedimentary aquifer, fractured aquifer, tunnel, Lisbon.

1 INTRODUÇÃO

A elaboração do modelo conceitual de conectividade hidráulica dos aquíferos sedimentar e fraturado no Vale de Alcântara, localizado às margens do Rio Tejo (cidade de Lisboa, Portugal) teve por objetivo compreender as relações e comportamentos hidráulicos entre o aquífero aluvionar e os calcários e basaltos fraturados.

O estudo foi desenvolvido para apoio à construção do túnel de Alcântara, a ser realizada nas margens do Rio Tejo. O túnel, projetado para o transporte de mercadorias e de pessoas, conta, também, com a construção de uma estação em ambiente subterrâneo já construído, que atualmente inclui estacionamentos de edifícios, canais pluviais, o Caneiro de Alcântara, estação de bombeamento, docas, etc. (Figura 1).

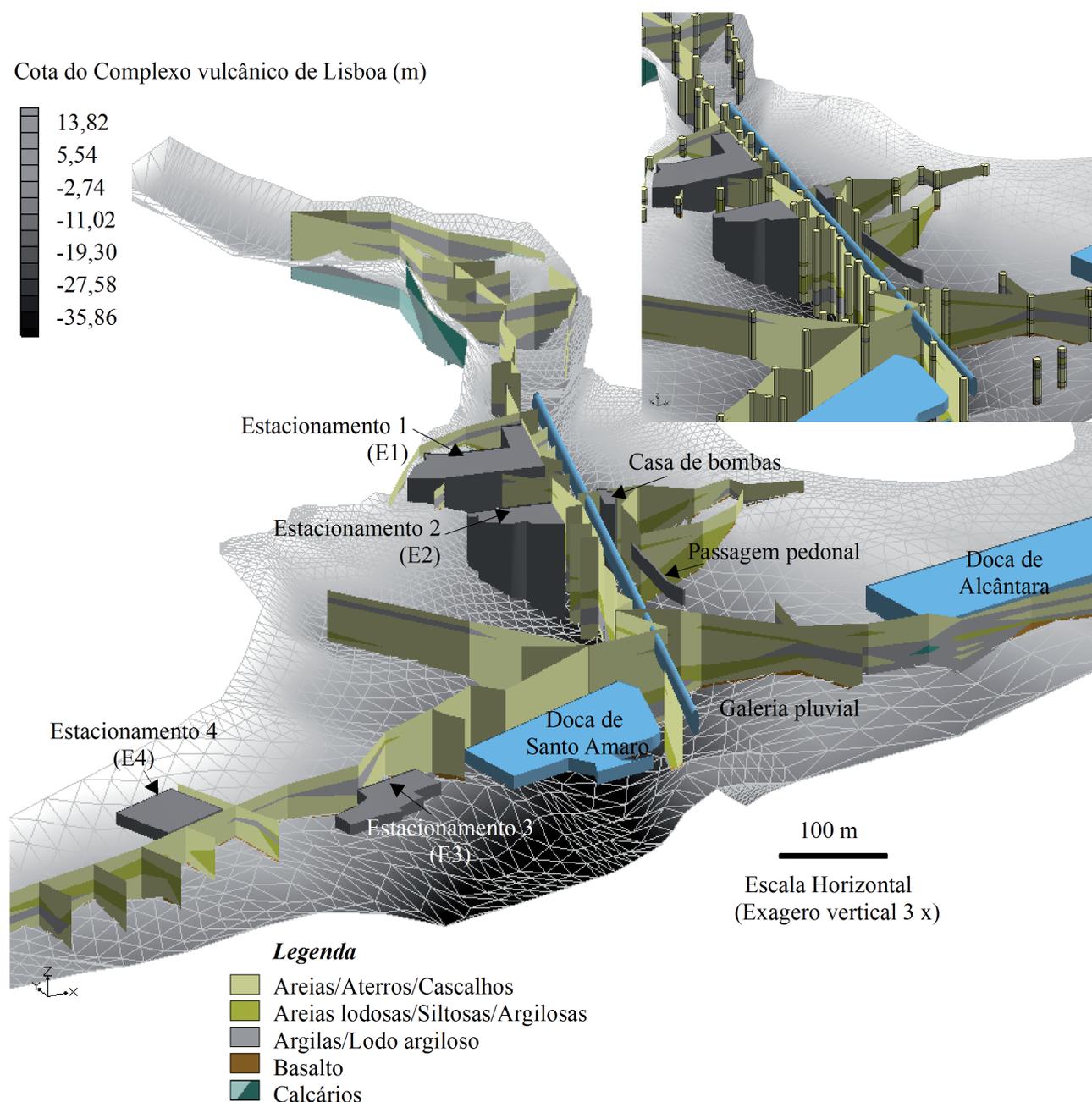


Figura 1 – Elementos subterrâneos e estratificação litológica do aquífero aluvionar de Alcântara

A segurança na intervenção do sistema sedimentar costeiro, já alterado por construções e sujeito à influência das oscilações de maré das águas do rio Tejo e intrusão dessas mesmas águas ao longo do Caneiro (MANCUSO et al. 2013), requer o conhecimento do comportamento e conectividades hidráulicas subterrânea - superficial e subterrânea - subterrânea (sedimentar - fraturado).

O aquífero sedimentar, formado pelos sedimentos aluvionares, apresenta intercalações de argilas siltosas e argilas arenosas, por vezes com componente orgânica e, ocasionalmente, componente margosa; areias médias e grosseiras com passagens a areias finas por vezes lodosas com níveis de cascalhos; argilas lodosas e siltes lodosos; e de seixos com matriz arenolodosa.

Estes níveis apresentam espessuras irregulares, por vezes lenticulares. A espessura da formação diminui progressivamente na direção da zona de afloramento Complexo Vulcânico de Lisboa e aumenta na direção do Caneiro, em direção ao rio Tejo, atingindo espessuras entre os 30 e os 43 m. A oeste da área de estudo as espessuras são mais reduzidas, variando entre os cerca de 6 m e os 16 m, nesta zona as espessuras aumentam no sentido do rio Tejo (MANCUSO et al. 2010). Este aquífero é limitado em sua base pelo Complexo Vulcânico de Lisboa (basaltos) e, parcialmente a N, por Calcários compactos e Calcários apinhoados (ALMEIDA, 1985).

Os aterros presentes na área de estudo são constituídos por um conjunto de materiais heterogêneos arenosos e argilosos, não coerentes, de deposição antropogênica. De acordo com Gapres (2008a), a composição dos aterros tem componente silto-argilosa desenvolvida, com fragmentos líticos dispersos. Na margem direita do Tejo

a composição é predominantemente arenosa, em grande parte com areias trazidas da margem esquerda (zona da Trafaria). As suas espessuras são bastante variáveis, entre 1,5 m e 9 m, sendo a espessura máxima atingida na zona de implantação do Caneiro de Alcântara.

2 METODOLOGIA

Com vista à elaboração do modelo conceitual, no que se refere a análise de parâmetros que possam afetar a hidráulica do aquífero aluvionar, foram realizadas as seguintes atividades:

1. agrupamento de litologias de acordo com os parâmetros bibliográficos de condutividades hidráulicas (K);
2. análise de resultados de ensaios de permeabilidade (Lefranc, Triaxial, Lugeon). Para fins de caracterização da condutividade hidráulica (K) do aquífero aluvionar, foram analisados os resultados dos ensaios Triaxiais (15 ensaios) e de LeFranc (41 ensaios) (Figura 2). Para fins de caracterização da condutividade hidráulica (K) do aquífero fraturado, foram realizados 20 ensaios de Lugeon (Figura 3);
3. análise do grau de fraturação e alteração da rocha, base do aquífero de porosidade granular (Complexo Vulcânico de Lisboa e Calcários);
4. a análise da relação hidráulica entre o aquífero de porosidade granular e o maciço subjacente, formado por Basaltos/Tufos vulcânicos/Brechas, Calcários esbranquiçados e Margas, foi realizada com base nos registos dos níveis de água de 33 piezômetros multiníveis instalados nas proximidades do Rio Tejo e do Caneiro de Alcântara, entre os anos de 2008 e 2009.

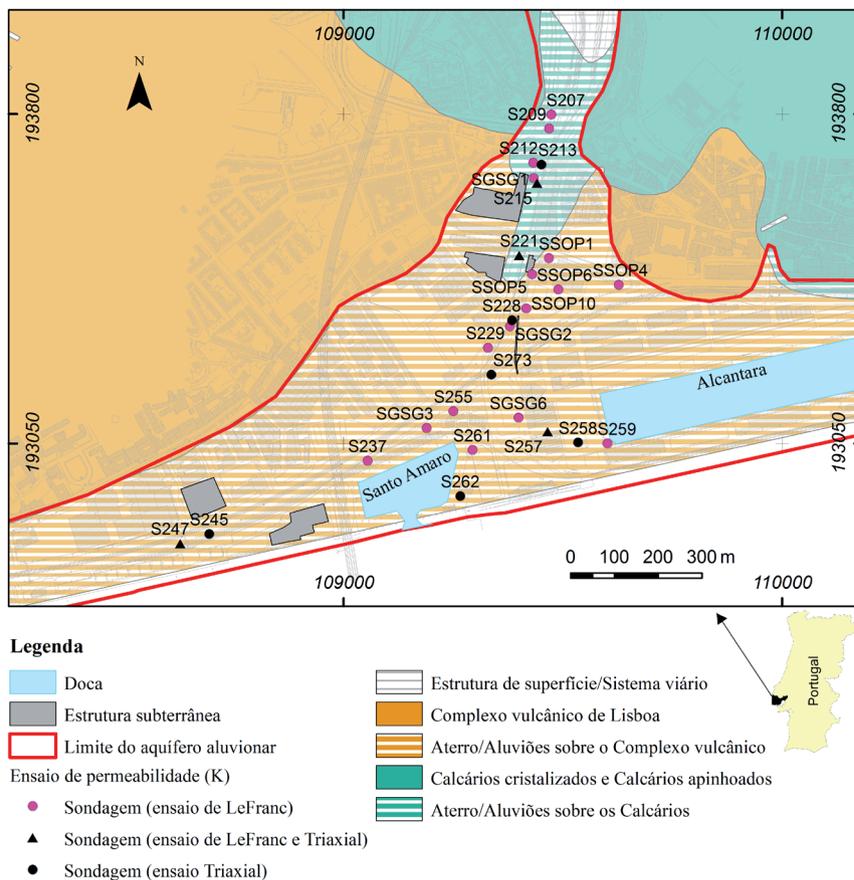


Figura 2 – Localização dos ensaios de permeabilidade de LeFranc e local de recolha de amostra para a realização de ensaios Triaxiais

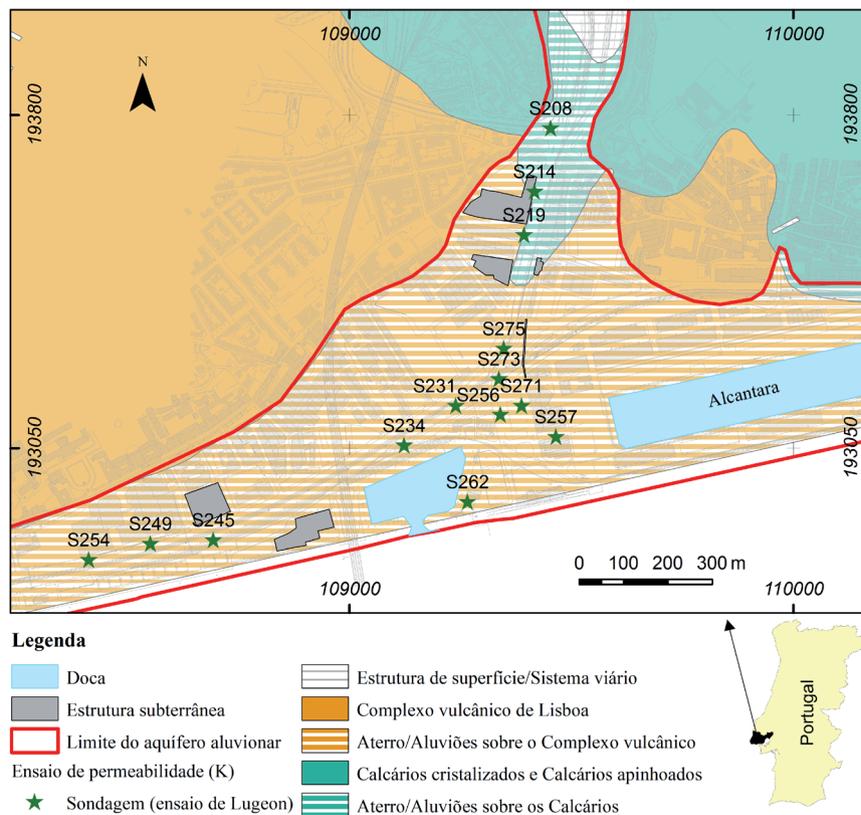


Figura 3 – Localização dos ensaios de permeabilidade de Lugeon

O estudo foi desenvolvido com base em dados bibliográficos e de ensaios realizados na área, por Gapres (2008a, 2008b, 2009a, 2009b, 2009c, 2009d, 2009e, 2010), Sopecate (2005) e Teresa et al. (2007).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Características Hidráulicas (K) do aquífero de porosidade granular

De acordo com os resultados dos ensaios consolidados não drenados com medição de pressões intersticiais e avaliação do coeficiente de permeabilidade (Triaxial) (Figura 2), os intervalos de K_z oscilam entre 0,76 m/d para a areia fina a média e $3,43 \times 10^{-7}$ m/d para a argila ligeiramente arenosa. Os “lodos argilosos e arenosos” apresentaram K_z de $2,35 \times 10^{-3}$ m/d a $1,63 \times 10^{-07}$ m/d.

Os resultados dos ensaios de LeFranc (Figura 2), realizados principalmente nas areias, indicaram K de 17,19 m/d na areia fina a média a 0,01 m/d na areia fina com fragmentos de conchas.

3.2 Características hidráulicas do Complexo Vulcânico de Lisboa e dos Calcários

Para a compreensão do funcionamento hidrogeológico do aquífero livre e a sua relação com a hidráulica dos sistemas fraturados, é importante considerar as zonas de contato entre os aluviões, o Complexo vulcânico de Lisboa, do Cretácico terminal e os Calcários cristalizados com rudistas e calcários apinhoados com *Neolobites vibrayeanus*, do Cenomaniano superior (ALMEIDA, 1985) (Figura 3). Subjacentes aos Calcários cristalizados encontram-se os Calcários margosos e margas (Belasiano) do Cenomaniano médio.

Os calcários compactos adquirem um caráter mais margoso para o topo da sequência, onde alternam com margas (PAIS et al. 2006). Estas formações encontram-se fraturadas e com um grau variável, por vezes significativo, de carsificação.

O Complexo vulcânico de Lisboa (com intercalações vulcano-sedimentares) está representado por escoadas lávicas, essencialmente basálticas, compactas, intercaladas por unidades de tufos e tufos argilosos, constituindo depósitos não consolidados e muito alterados, embora o grau de alteração seja variável ao longo da região; estas

unidades de tufos correspondem às unidades piroclásticas alteradas. Por vezes as unidades lávicas, devido à alteração intensa, apresentam um certo grau de argilificação.

Através das sondagens à rotação, foi caracterizado geotecnicamente o perfil de investigação, nomeadamente no que diz respeito ao estado de fraturação do maciço e ao grau de alteração. Para a caracterização da fraturação do maciço rochoso e grau de alteração, foram utilizados os seguintes critérios:

- 1) Classificação do espaçamento entre fraturas:
 - a. F1 - Muito afastadas (>2 m)
 - b. F2 - Afastadas (0,6 m – 2 m)
 - c. F3 - Medianamente afastadas (0,2 m – 0,6 m)
 - d. F4 - Próximas (0,06 m – 0,2 m)
 - e. F5 - Muito próximas (<0,06)
- 2) Classificação do estado de alteração:
 - a. W1 - Rocha Sã (rocha sã, sem nenhum sinal de alteração, de cor lustrosa em toda a sua massa)
 - b. W2 - Rocha pouco alterada (alteração desenvolvida nas superfícies de discontinuidades, mas a parte intacta entre estas, mantém a cor lustrosa)
 - c. W3 - Rocha medianamente alterada (meteorização acentuada nas zonas de discontinuidades e a partir destas para o interior; descoloração estendida à maior parte do maciço rochoso)
 - d. W4 - Rocha muito alterada (alteração generalizada de todo o maciço rochoso, parcialmente transformado em materiais residuais ou facilmente desagregáveis)
 - e. W5 - Rocha decomposta (rocha completamente decomposta e friável, preservando as estruturas da rocha original; evidencia comportamento terroso)
 - f. W6 - Solo Residual (a rocha mudou de cor e alterou completamente a sua textura que ficou totalmente destruída, mudando para solo)

A caracterização do estado de fraturação e do grau de alteração do maciço (16 ensaios), no que se refere ao Complexo vulcânico de Lisboa indicou predomínio de rocha medianamente alterada a muito alterada (W3/W4), com espaçamento entre

as fraturas de Próximo (F4) a Muito próximo (F5). Os ensaios foram realizados a distintas profundidades, entre as cotas -42,5 m e -17,7 m (Figura 4).

Em relação às Margas (2 ensaios à norte da área), a caracterização do grau de alteração do maço indicou a presença de rocha medianamente

alterada a rocha decomposta (W3/W5) e em relação ao estado de fraturação, observou-se espaçamento entre as fraturas de Medianamente afastado (F3) a Muito próximo (F5). Os ensaios foram realizados a distintas profundidades, entre as cotas -34,7 m e -26,6 m.

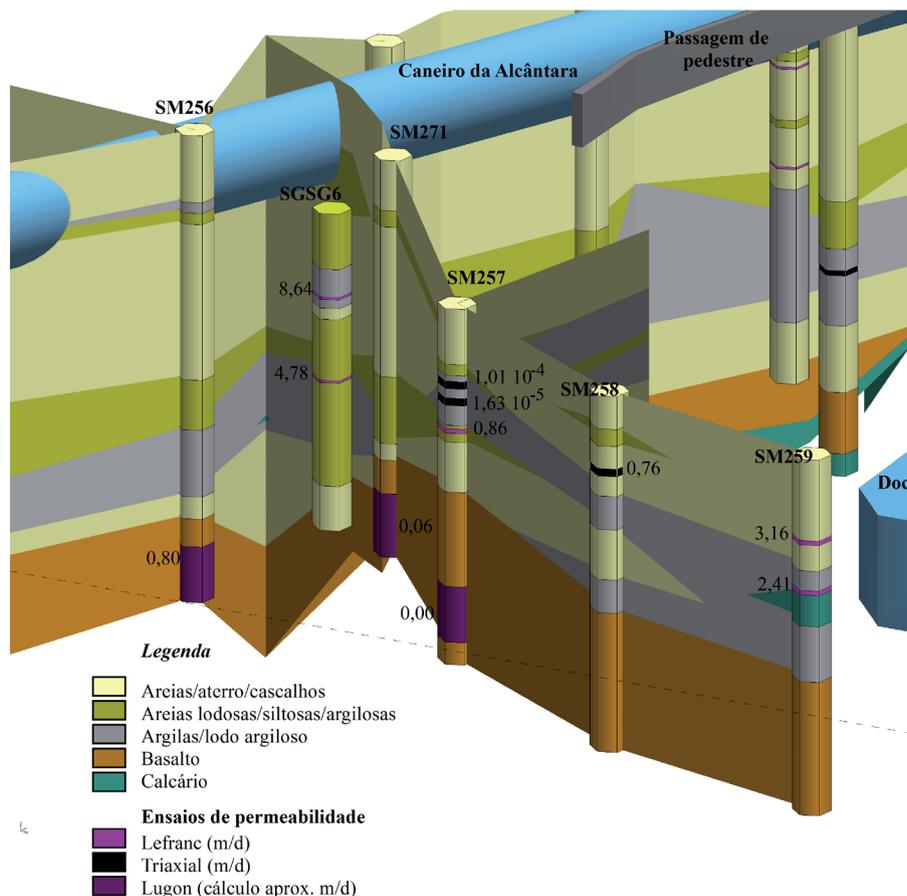


Figura 4 - Localização de ensaios de permeabilidade, de acordo com os grupos litológicos definidos no estudo. Sondagens SM256, SM271, SGSG6, SM257, SM258 e SM259

Os calcários (2 ensaios à norte, próximo ao Caneiro) apresentaram grau de alteração do maço semelhante ao das Margas, com rochas medianamente decompostas a decompostas (W3/W4, com presença de W5). Em relação ao estado de fraturação, observou-se espaçamento entre as fraturas com predomínio de fraturas Próximas (F4) a Muito próximas (F5). Os ensaios foram realizados a distintas profundidades, entre as cotas -42,5 m e -31,7 m.

Os resultados dos ensaios de Lugeon realizados em distintas formações indicaram K entre 0,0 m/d e 0,8 m/d no basalto (Complexo vulcânico de Lisboa); entre 0,0 m/d e 0,65 m/d nas Margas

acinzentadas e as Margas argilosas; entre 1,59 m/d e 2,32 m/d nos Calcários esbranquiçados; e entre 0,0 e 0,91 m/d no Tufo vulcânico/Brecha (Complexo vulcânico de Lisboa).

Para facilitar a análise da heterogeneidade litológica do meio, os resultados dos ensaios foram vinculados às profundidades de execução de forma à auxiliar na indicação de grupos litológicos. Estes foram definidos em função da descrição geológica e com os parâmetros de condutividades hidráulicas (K) obtidos (Figura 4). Dessa forma, a partir dos ensaios de permeabilidade, foram indicados valores máximos e mínimos de K para os mesmos.

3.3 Piezometria do aluvião e do maciço rochoso subjacente (Complexo Vulcânico de Lisboa e Calcários)

Segundo os dados de piezometria recolhidos entre 2008 e 2009, em 32 piezómetros instalados no maciço fraturado, 75% apresentaram níveis de água superiores aos do aquífero aluvionar, com diferença variável entre 0,44 m (instalado no Basalto)

e 0,01 m (instalado no Calcário) (Figura 5). A análise estende-se ao norte da área da estação em função da importância desta zona de passagem de águas do aquífero aluvionar. Considerando que o fluxo das águas subterrâneas entre os sistemas ocorre de maior para menor carga hidráulica, em condições de conectividade, as águas do maciço fraturado podem contribuir para o aquífero poroso.

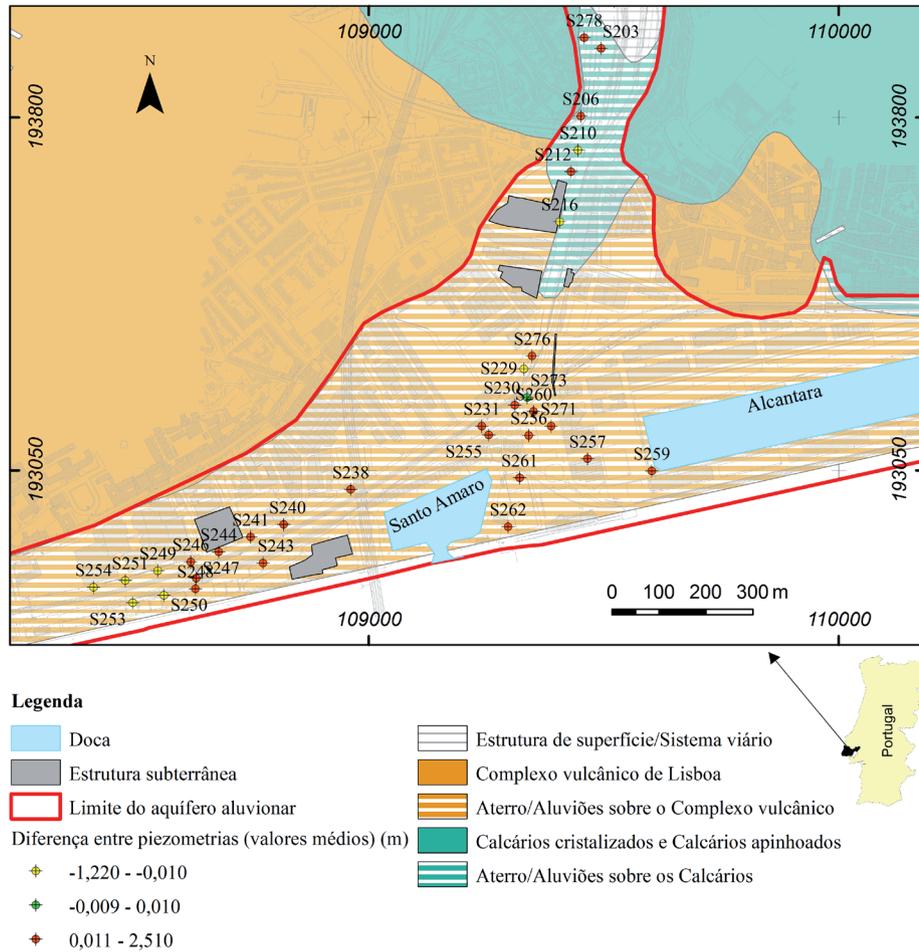


Figura 5 - Localização dos piezómetros multiníveis com indicação da diferença entre a piezometria do maciço fraturado e a do aluvião

Em 25% dos piezómetros, as cargas hidráulicas do aquífero aluvionar foram superiores às observadas no maciço subjacente, apresentando diferenças de, pelo menos, 0,50 m (instalado na Marga).

Comparando os níveis de água do maciço fraturado com os níveis freáticos do aluvião, observa-se a semelhança entre o comportamento dos sistemas monitorizados. A variação dos níveis em períodos próximos, simultaneamente em ambos os sistemas, associado à evidência da influência da maré do Rio Tejo, no aquífero aluvionar

(MANCUSO et al. 2009 e 2013) indica provável conexão hidráulica entre a rocha fraturada e as águas do rio, que influenciariam, também, a descarga e os níveis de água do maciço.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos permitiram identificar o seguinte contexto hidrogeológico a norte da área de estudo: o aquífero calcário os basaltos fraturados e os sedimentos quaternários depositados sobre os

mesmos, estes compõem o aquífero poroso com características de aquífero livre.

De acordo com as interpretações das sondagens e dos perfis das sondagens, as espessuras do aquífero poroso variam entre os 26 m e os 21 m, seguindo o curso da antiga ribeira de Alcântara, aumentando em direção ao rio Tejo, onde apresenta espessuras entre os 30 e os 43 m. Na área da futura estação de Alcântara (zona a norte), foi possível observar que o contacto em superfície, entre os basaltos e as formações que constituem o aquífero poroso, se localiza próximo à Rua das Fontainhas, sob área edificada de montante. Nesse local, nas proximidades do Caneiro, as espessuras são da ordem de 24 m, o aquífero poroso indicia uma redução progressiva de espessura para oeste, atingindo valores de cerca de 3,2 m, até o contato, em superfície, com o Complexo Vulcânico de Lisboa.

Os resultados dos ensaios de LeFranc, realizados principalmente nas areias, indicaram K de 17,19 m/d na areia fina a média a 0,01 m/d na areia fina com fragmentos de conchas. De acordo com os resultados dos ensaios Triaxial, os intervalos de K_z oscilam entre 0,76 m/d para a areia fina a média e $3,43 \times 10^{-7}$ m/d para a argila ligeiramente arenosa. Os "lodos argilosos e arenosos" apresentaram K_z de $2,35 \times 10^{-3}$ m/d a $1,63 \times 10^{-7}$ m/d.

A caracterização do estado de fraturação e do grau de alteração do maciço subjacente ao aquífero aluvionar, (Complexo vulcânico de Lisboa, Calcários e Margas), indicou predomínio de rocha medianamente alterada (W3) a rocha decomposta (W5), com espaçamento entre as fraturas de Medianamente afastado (F3) a Muito próximo (F5). Os ensaios foram realizados a distintas profundidades, entre as cotas -42,5 m e - 17,7 m. Os resultados dos ensaios de Lugeon realizados nestas formações indicaram K máximo de 0,8 m/d no basalto (Complexo vulcânico de Lisboa), 0,65 m/d nas Margas, 2,32 m/d nos Calcários esbranquiçados e 0,91 m/d no Tufo vulcânico/Brecha (Complexo vulcânico de Lisboa).

Segundo os dados de piezometria observam-se, em geral, que as cargas hidráulicas no maciço fraturado são superiores às do aluvião, indicando, possibilidade de fluxos ascendentes dos sistemas fraturados em relação ao sedimentar. A semelhança entre o comportamento dos níveis

dos aquíferos fraturados em reação ao freático indica possível influência dos níveis do rio Tejo na hidrodinâmica desses sistemas.

Agradecimentos

À REFER (os dados e elementos aqui apresentados foram obtidos no âmbito de trabalhos desenvolvidos pelo LNEC para a REFER, sendo de propriedade da mesma). Ao LNEC, pelo apoio no desenvolvimento do Pós Doutorado.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA F.M. 1985. Carta Geológica do Concelho de Lisboa. Direcção-geral de Geologia de Minas. Serviço Geológico de Portugal. Gravado e Composta em Geocart. Serviço Cartográfico do Exército, escala 1:10.000.

GAPRES. 2008a. Ligação Desnivelada da Linha de Cascais e do Porto de Lisboa à Linha de Cintura, Estudo Prévio, Volume 3 - Geologia e Geotecnia, Julho de 2008.

GAPRES. 2008b. Ligação Desnivelada da Linha de Cascais e do Porto de Lisboa à Linha de Cintura, Estudo Prévio, Volume 4 - Hidrologia e Drenagem, Julho de 2008.

GAPRES. 2009a. Ligação Desnivelada da Linha de Cascais e do Porto de Lisboa à Linha de Cintura - Variante 2, Estudo Prévio, Volume 3 - Geologia E Geotecnia, Março de 2009. Desenhos, 1-2. 24 p.

GAPRES. 2009b. Ligação Desnivelada da Linha de Cascais e do Porto de Lisboa à Linha de Cintura - Variante 3, Estudo Prévio, Volume 3 - Geologia E Geotecnia, Março de 2009. Desenhos, 3-4. 23 p.

GAPRES. 2009c. Ligação Desnivelada da Linha de Cascais e do Porto de Lisboa à Linha de Cintura, Estudo Prévio, Informação Geotécnica. Perfil Geológico da Ligação da Linha de Cintura à Linha de Cascais, Eixos 1 e 2, Fevereiro 2009.

GAPRES. 2009d. Ligação Desnivelada da Linha de Cascais e do Porto de Lisboa à Linha de Cintura, FASE IV - Detecção da interface com os basaltos no Largo do Calvário e Rua das Fontainhas.

- Relatório Factual REF^a 10/2009/02/GER-1231, Fevereiro de 2009.
- GEOPLANO. 2010. Prospecção Geológico-Geotécnica do Projecto de Desnívelamento Ferroviário de Alcântara, nas áreas de Desenvolvimento das Variantes 2 e 3. Relatório Factual REF^a 4748_RLT.01.v6.vp, Junho de 2010.
- MANCUSO M.A., Carol E., Kruse E. 2013. Utilização de sondas multiparamétricas para análise da influência da maré em aquífero aluvionar costeiro. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, RS. Atas, p.8.
- MANCUSO M.A., Kruse E., Deluchi M. 2010. A utilização de modelação numérica hidrogeológica como instrumento de apoio no planeamento da ocupação do espaço urbano subterrâneo. In Anais do Encontro Nacional sobre o Espaço Subterrâneo e a sua Utilização. LNEC. Comissão Portuguesa de Túneis CPT, Sociedade Portuguesa de Geotecnia SPG. Lisboa. Portugal. ART025, Atas, p. 8.
- MANCUSO M.A., Novo M.E., Ferreira J.P.C.L. 2009. Modelo matemático do escoamento Subterrâneo no vale de Alcântara. 1.o Relatório Sectorial da Fase 2: Águas Subterrâneas. Relatório LNEC 229/2009 - NAS. Lisboa, Portugal. 47 p.
- PAIS J., Moniz C., Cabral J., Cardoso J.L., Legoinha P., Machado S., Morais M.A., Lourenço C., Ribeiro M.L., Henriques P., Falé P. 2006. Carta Geológica de Portugal, 1:50000, Notícia Explicativa da Folha 24-D, Lisboa". Lisboa, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, pp. 74.
- SOPECATE - Sociedade de Pesquisas Captações de Água e Transportes, S.A. 2005. Relatório Geotécnico. Empreendimento Alcântara-Mar Lisboa. EPUL - Empresa Pública de Urbanização de Lisboa.
- TERESA D., Sacadura C., Correia J.E. 2007. Estudo Geológico-Geotécnico, Projecto de Execução, Proc. 28607. Invesfer, Geocontrolo, Agosto de 2007, pp. 74.

