

A UTILIZAÇÃO DE MODELAÇÃO NUMÉRICA HIDROGEOLÓGICA COMO INSTRUMENTO DE APOIO NO PLANEAMENTO DA OCUPAÇÃO DO ESPAÇO URBANO SUBTERRÂNEO

APPLYING HYDROGEOLOGICAL NUMERICAL MODEL AS SUPPORTING TOOL FOR PLANNING UNDERGROUND URBAN SPACE

Mancuso, Malva A., *Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, Lisboa, Portugal*, mmancuso@lnec.pt

Deluchi, Marta, *Facultad de Ciencias Naturales y Museo (U.N.La Plata), Argentina*, mdeluchi@fcnym.unlp.edu.ar

Kruse, Eduardo, *CONICET - Facultad de Ciencias Naturales y Museo (U.N.La Plata), Argentina*, kruse@fcnym.unlp.edu.ar

RESUMO

Na região de Alcântara (Lisboa), foi aplicada modelação numérica, utilizando o código 3D de diferenças finitas MODFLOW 2000, para a simulação da dinâmica das águas subterrâneas do aquífero aluvionar costeiro e do efeito nela provocado pela presença de estruturas e barreiras hidráulicas presentes no subsolo. A área, de 1,34 km², foi dividida em células de 10 x 10 m nas direcções x e y, e 3 camadas de espessura variável na direcção z. A calibração foi realizada para o estado estacionário e transitório (considerando oscilações de maré). Após a calibração, foram simulados eventos extremos combinados (máximas recargas, máximas descargas pluviais e marés vivas). Os resultados indicaram modificações na direcção do fluxo das águas subterrâneas e elevações locais dos níveis devido à presença das estruturas, permitindo identificar as áreas mais sensíveis à inserção de novas estruturas.

ABSTRACT

To simulate the effect of hydraulic barriers and underground structures on the flow system a hydrogeological numerical modeling was applied in the alluvial coastal aquifer of Alcântara (Lisbon). The groundwater dynamics was simulated using MODFLOW 2000, a 3D finite differences code. The modeled area, with 1.34 km², and was discretized into 10 x 10 m cells in x and y directions, and 3 layers of variable thickness in the z direction. The model calibration was concluded for steady state and transient state conditions (considering tidal fluctuations). After calibration, combined extreme events were simulated (maximum recharge and pluvial discharges, and high tides). The result indicates changes in flow direction and increase on local groundwater levels due to underground structures. The modeling processes allowed identifying sensitive areas for the construction of new structures.

1. INTRODUÇÃO

A execução de obras subterrâneas, assim como as de superfície, também envolvem questões de impacto ambiental, entre os quais o impacto hidrogeológico. Este, por vezes equacionado durante a implantação da obra, pode apresentar as suas consequências a médio e longo prazo.

Na área de Alcântara (Lisboa, Portugal), foi aplicada modelação numérica para a simulação da dinâmica das águas subterrâneas do aquífero aluvionar, a sua interacção com as águas

superficiais do rio Tejo, das docas, do Caneiro de Alcântara (antiga ribeira parcialmente canalizada) e o efeito nelas provocado pela presença de estruturas e barreiras hidráulicas presentes no subsolo.

Destacam-se na área, estruturas subterrâneas como o Caneiro, que apresenta contacto directo com o aquífero por meio da sua base permeável, parques de estacionamento, galerias pluviais, passagem pedonal e estrutura para bombagem.

2. A ÁREA DE ESTUDO

No contexto hidrogeológico, estudou-se a dinâmica do aquífero aluvionar, delimitado na sua base pelo Complexo vulcânico de Lisboa (basaltos) e, parcialmente a N, por Calcários compactos e Calcários apinhoados (Serviço Geológico de Portugal, 1985) (Figura 1).

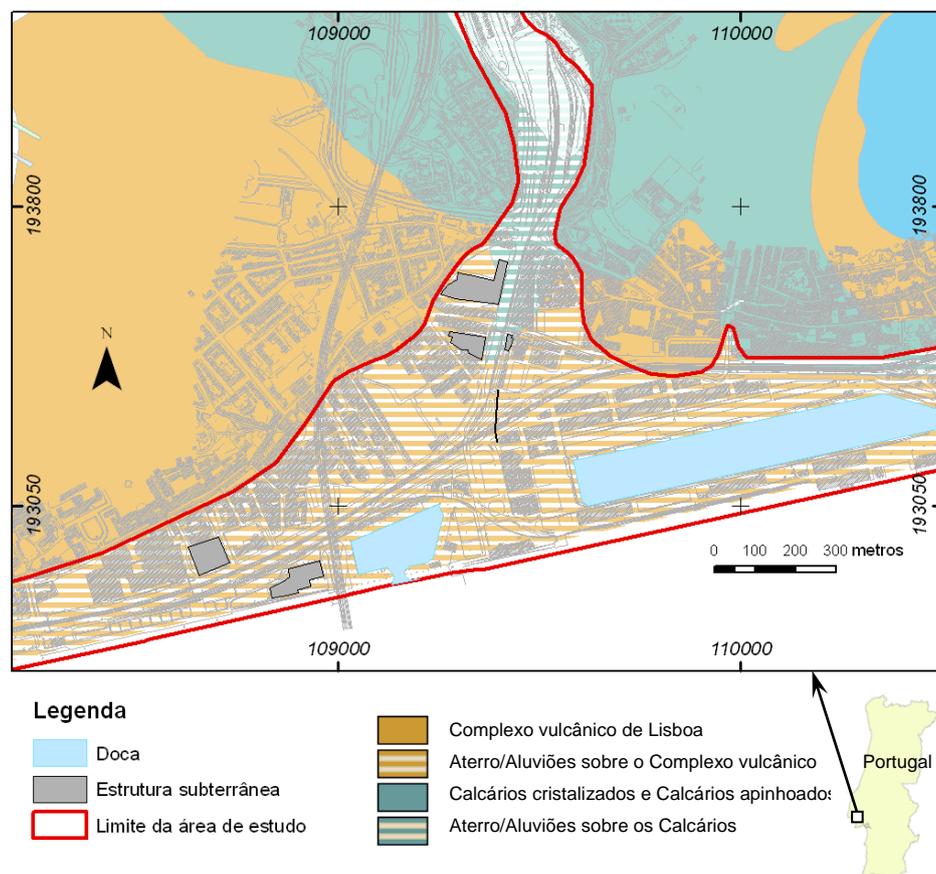


Figura 1. Mapa geológico da zona de Alcântara, com destaque da área de estudo (aquífero aluvionar) (modificado de Serviço Geológico de Portugal, 1985)

Foram utilizadas, para a caracterização da geometria e hidráulica do sistema aluvionar, dados de 144 sondagens e 39 ensaios de Lefranc realizadas e recolhidas para o Projecto de Desnívelamento Ferroviário de Alcântara (disponibilizadas pela REFER).

O aquífero enquanto formação geológica, apresenta estratificação vertical, sendo constituído principalmente por areias médias a finas, por vezes com pequenos seixos, restos de conchas e fragmentos de rochas, níveis areno argilosos e argilo arenosos. Também se observam níveis de argilas lodosas, principalmente próximo à base do aquífero, na área subjacente ao Caneiro de

Alcântara (Figura 2). À superfície, ocorre uma camada de aterro, incorporada, neste estudo, ao aquífero estudado.

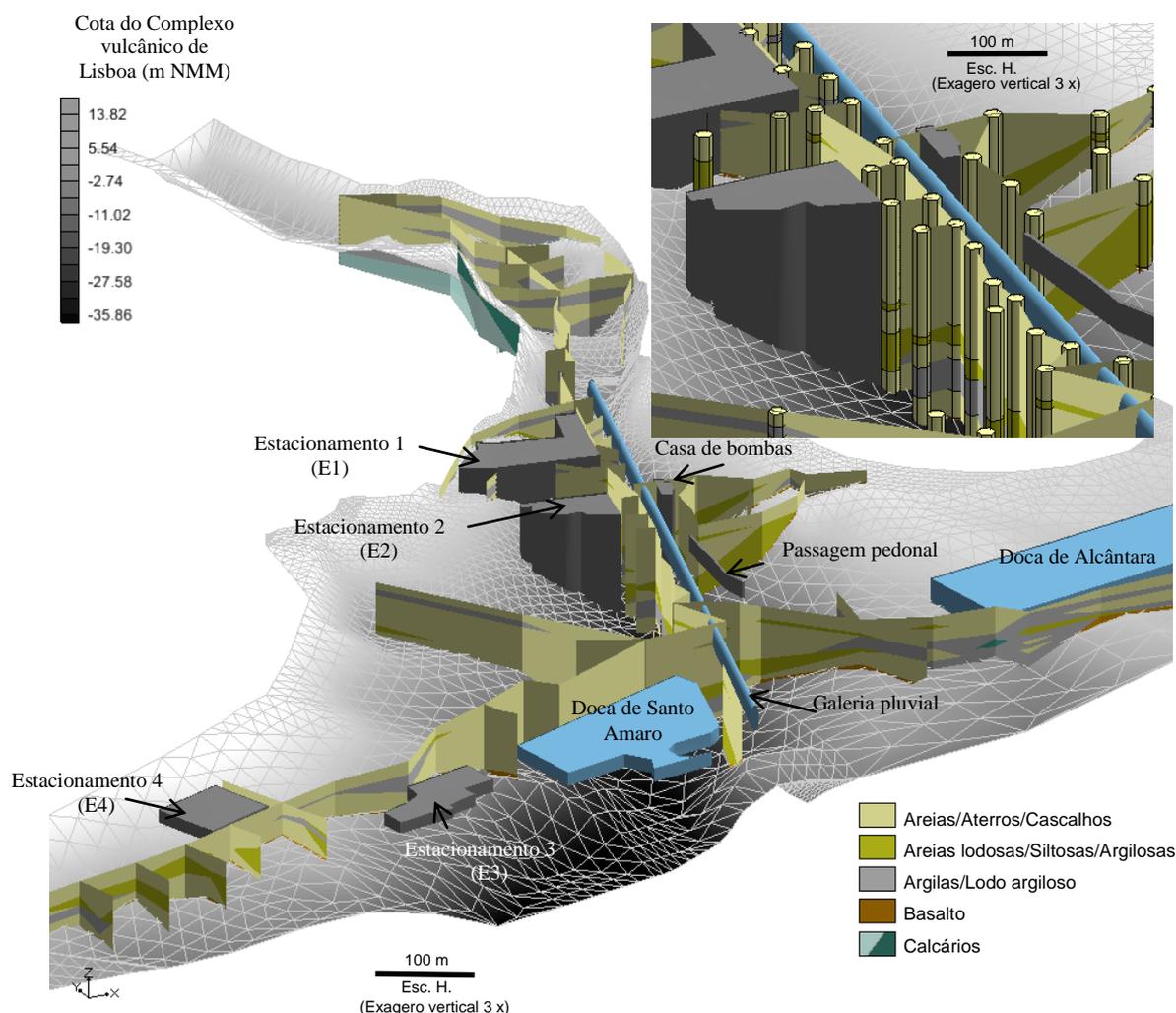


Figura 2 – Elementos subterrâneos considerados na elaboração do modelo matemático de fluxo das águas subterrâneas do aquífero aluvionar da área de Alcântara

Foram identificados dois contextos hidrogeológicos na área estudada: o aquífero calcário, a Norte e o aquífero aluvionar, constituído por sedimentos quaternários, que lhe conferem características de aquífero livre.

A área de afloramento do aquífero aluvionar, em Alcântara, está restrita a uma faixa entre os basaltos do complexo vulcânico de Lisboa e o Rio Tejo. A sua espessura aumenta na direcção do rio Tejo e nas proximidades do Caneiro de Alcântara, atingindo cotas da ordem dos -40,0 m (Mancuso *et al.* 2009), próximo à zona de embocadura da antiga ribeira (zona do Porto de Lisboa/Terminal de Contentores) (Figura 2).

Este aquífero apresenta porosidade granular e as condutividades hidráulicas (k) variam entre 0,01 m/d e 17 m/d, de acordo com ensaios Lefranc realizados na área por COBA, S.A. (em 2008) e Gabinete de Serviços Técnicos Lda. (em 2008) (disponibilizado em CD-ROM, 2009).

Para a caracterização da piezometria e dinâmica dos níveis de água subterrânea no meio poroso saturado, foram considerados dados de 11 piezômetros (GAPRES, 2008 e Oliveira *et al.*, 2008) e sondagens realizadas na área. O estudo das oscilações dos níveis de água subterrânea devido à influência da maré foi realizado a partir de dados colectados durante o período de um ano. Os resultados indicam níveis médios de água (apresentados neste estudo em relação ao nível médio do mar), variáveis consoante a maré, entre 0,2 m e 2,1 m. No caso dos instrumentos instalados próximos ao Rio Tejo e do Caneiro de Alcântara, a variação média do nível de água subterrânea é da ordem de 1,6 m (Mancuso, 2008; Leitão, 2009).

Dados de temperatura (T) observados na coluna de água do aquífero aluvionar também evidenciam as zonas de interacção entre o aquífero e as águas superficiais (Rio Tejo, galerias pluviais/outras e docas). Nas proximidades da Doca de Santo Amaro, as águas profundas, à cota de -15,9 m, apresentam temperaturas constantes, da ordem de 19,7°C. Observa-se a diminuição da temperatura na direcção da superfície, que atinge 18,9°C na cota -0,97 m. Este parâmetro também apresenta variabilidade temporal ao longo do dia, evidenciando a influência das oscilações da maré nas temperaturas do sistema (Figura 3).

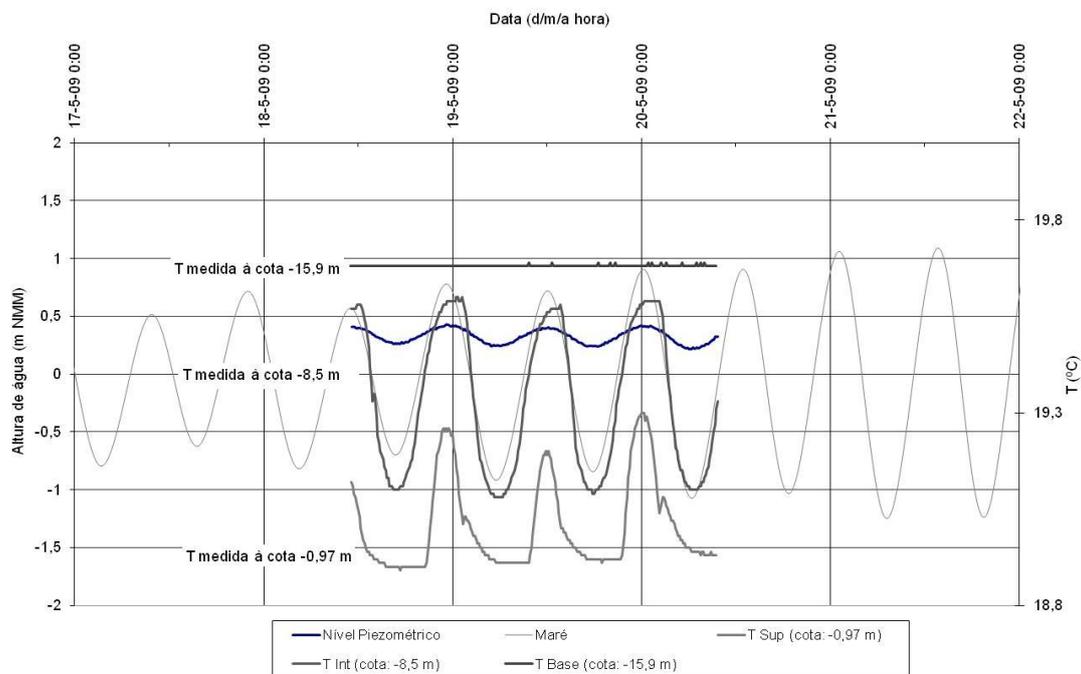


Figura 3 – Oscilação do nível piezométrico, da maré e da temperatura (T) na coluna de água do aquífero aluvionar, nas proximidades da Doca de Santo Amaro.

3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A simulação de fluxo advectivo realizada neste estudo foi orientada de acordo com os princípios indicados por Anderson e Woessner (1992). Considerando as condições limites e as solicitações impostas ao meio, foi adoptado conceptualmente, para a elaboração do modelo matemático, o comportamento de aquífero livre para a aluvião/aterro, sendo o basalto a sua base impermeável. No caso da área de estudo, o aquífero foi considerado anisotrópico e heterogéneo, sujeito à recarga pela infiltração de águas meteóricas e à influência do sistema de drenagem das águas superficiais (natural e imposto pela acção antrópica, como no caso de vazamentos da rede de abastecimento de água). Considerou-se, para a simulação e calibração do sistema, uma recarga

espacialmente variável, com valores médios da ordem de 169 mm/ano de acordo com Oliveira *et al.* (2008).

As condições de fronteira no limite Norte da área foram definidas como limite de fluxo constante (na interface com a área de afloramento dos basaltos e dos calcários) e carga hidráulica constante (nas áreas de afloramento do aquífero cársico, considerando dados de nível de água observados nas sondagens). Os valores de fluxo nestes limites foram obtidos com base nos resultados do modelo matemático regional, elaborado por Mancuso *et al.*, (2008) para a área, que considerou a aluvião os basaltos e os calcários numa área de aproximadamente 11 km².

O limite Sul do modelo matemático foi representado pelo rio Tejo e considerado como limite com carga hidráulica constante (0 m), no caso da simulação em estado estacionário e variável, de acordo com os níveis de maré, no modelo de fluxo transitório.

Foi utilizado para a modelação numérica o código de diferenças finitas MODFLOW (Harbaugh *et al.* 2000). A área de estudo, com extensão de 1,3 km², foi dividida numa malha constituída por 170 linhas e 284 colunas, com células de 10 m na direcção x, 10 m na direcção y e 3 camadas de espessura variável na direcção z, compondo ao todo uma malha com 39.864 células activas.

Foram considerados, na simulação do sistema, os seguintes elementos subterrâneos inseridos no aquífero aluvionar:

- 1) Barreiras hidráulicas: garagens subterrâneas, passagem pedonal e estação de bombagem;
- 2) Galerias de águas pluviais em contacto com os níveis de água do aquífero: Caneiro de Alcântara, outros;
- 3) Corpos de Água superficiais: Doca de Santo Amaro e Doca de Alcântara (Figura 4).

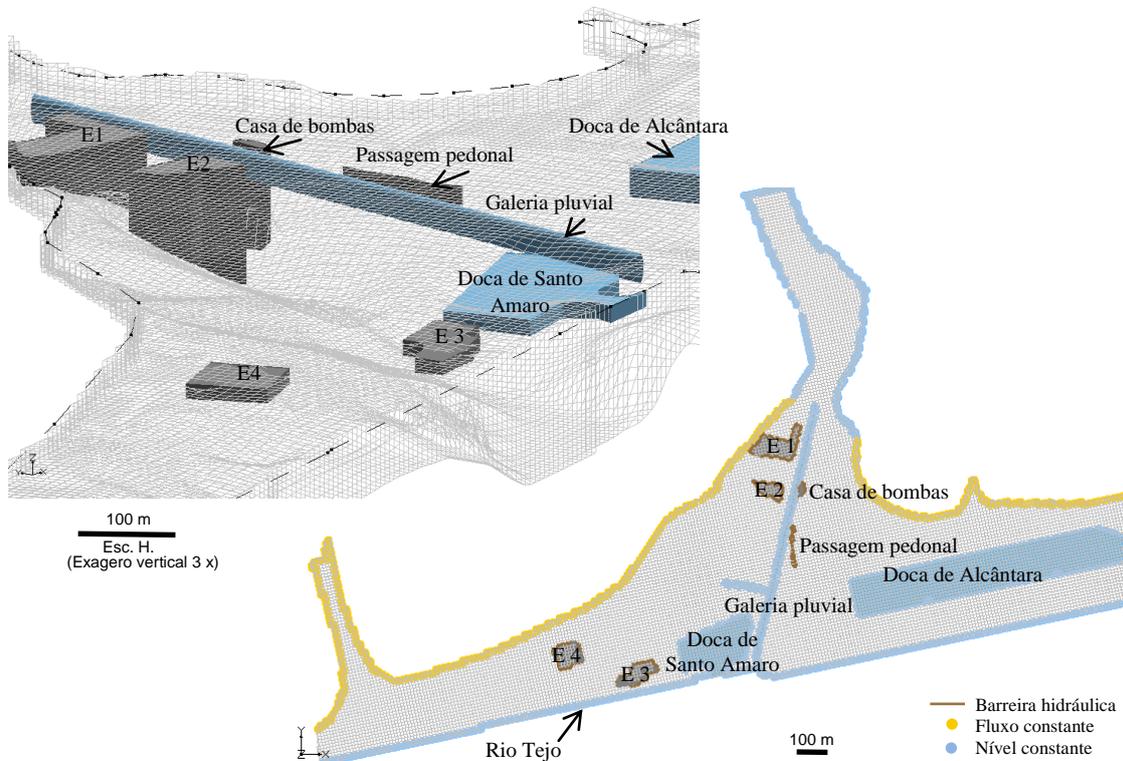


Figura 4 – Elementos subterrâneos considerados na elaboração do modelo matemático de fluxo subterrâneo da área de Alcântara

No processo de calibração em regime permanente, ou seja, sem considerar o factor tempo, considerou-se como carga hidráulica inicial a cota topográfica. As condutividades hidráulicas (k) resultantes da calibração apresentaram variação de 0,1 a 15 m/d, com os valores mais elevados nas áreas próximas à orla marítima. O resultado da calibração do modelo matemático indicou um erro médio absoluto (MAE) de 0,2 m, com desvio padrão (RMS) de 0,2 m.

Os níveis piezométricos resultantes indicam cotas médias entre 0 m, nas proximidades das áreas naturais de descarga das águas subterrâneas, como o rio Tejo, as docas e o Caneiro, e 2,5 m aproximadamente, na margem esquerda do Caneiro, na direcção da área de afloramento do calcário. Nas áreas mais baixas, as cotas médias não ultrapassam os 0,5 m. As direcções de fluxo ocorrem no sentido do rio Tejo, do Caneiro e das docas. O fluxo das águas subterrâneas sofre desvio no local onde intercepta as estruturas subterrâneas mais profundas, encontrando-se os níveis ligeiramente elevados nas proximidades das mesmas.

À esquerda do Caneiro, predominam cotas piezométricas da ordem de 0,3 m, que se elevam para Norte (área de afloramento dos calcários) e na direcção da encosta (área de afloramento dos Basaltos). Predominam cotas de até 0,5 m nas áreas baixas, que atingem, no geral, até 1,2 m nas proximidades de afloramento dos basaltos, sendo inferiores a 1,8 m nas proximidades do afloramento dos calcários. O fluxo predominante nesta área ocorre na direcção da Doca de Alcântara.

Com base no modelo em estado estacionário, foi simulado o comportamento do aquífero em estado transitório, durante um período de 24h, a partir da simulação do efeito da oscilação da maré, que influencia os níveis de água do Rio Tejo, das Docas e, parcialmente, do Caneiro. A porosidade do meio, entre 10% e 30%, foi resultante do modelo transitório calibrado.

Durante o período de maré baixa os fluxos predominantes no local ocorrem na direcção do rio Tejo, das docas e do Caneiro. No período de maré alta os fluxos invertem-se, temporariamente, nos locais próximos ao Caneiro, rio Tejo e docas, provocando a entrada da água superficial no aquífero (Figura 5). Numa faixa estreita que contorna estes limites hidráulicos, as oscilações atingem até 2,7 m.

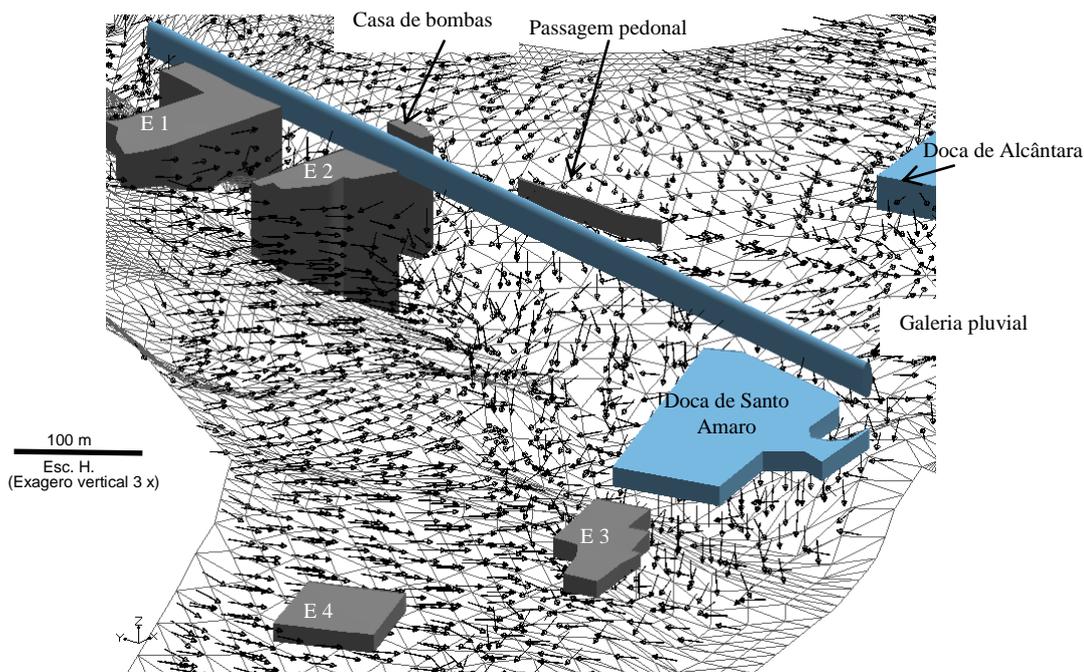


Figura 5 - Fluxo das águas subterrâneas durante o período de maré alta

Para entender a dinâmica das águas subterrâneas no período de maior precipitação (durante o inverno), considerando uma situação crítica, foi simulado o efeito de maré alta (aprox. 2 m), partindo do modelo transitório, associado à situação de carga extrema do Caneiro (4 m), no troço em que apresenta fundo móvel. Esta simulação teve por objectivo identificar os níveis esperados e as principais áreas afectadas, em caso de aumento crítico do escoamento superficial. Este processo foi representado pela elevação temporária da carga hidráulica no interior do Caneiro associado a baixa condição de descarga natural do sistema (devido à maré alta).

O resultado da simulação indicou a elevação dos níveis das águas subterrâneas para cotas próximas a 3,6 m, nas proximidades das galerias pluviais. A resposta do aquífero poroso indica possíveis áreas alagadas nas proximidades das estruturas do Estacionamento 1 e 2. Nessa área observa-se um estrangulamento do fluxo decorrente da barreira hidráulica, que eleva os níveis de água subterrânea para valores superiores a 3 m (Figura 6). Um impacto semelhante pode ser observado na área da casa de bombas (estrutura subterrânea onde se faz a bombagem do sistema de esgotos). Na área da passagem pedonal, há também uma barreira ao fluxo não tão acentuada, dado que esta estrutura, ao invés das anteriores, não atinge a rocha. Na sequência, a resposta do sistema à maré baixa, associada ao retorno da regularidade dos níveis do Caneiro (de acordo com as marés ordinárias), não permite, de forma imediata, restabelecer os níveis de oscilação regulares do aquífero. De acordo com a simulação, o sistema requer um período superior a 24h para recuperar a sua dinâmica ordinária.

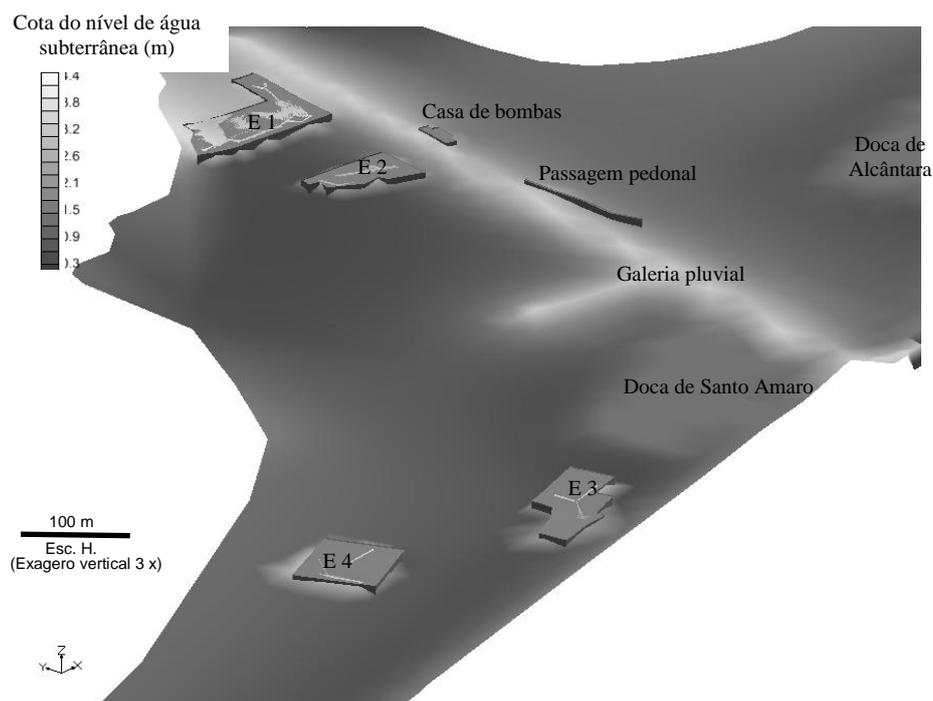


Figura 6 – Cota das águas subterrâneas (NMM) durante o período de maré alta e o Caneiro em Carga

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização da ferramenta de simulação matemática apresentou resultados representativos da dinâmica hídrica do aquífero aluvionar em Alcântara. Esta abordagem permitiu identificar possíveis áreas com necessidade de intervenção (devido à presença das estruturas subterrâneas actualmente existentes no subsolo) e as áreas mais sensíveis à inserção de novas estruturas.

De acordo com os resultados, a zona de contacto entre o aquífero aluvionar e os Calcários é a área de maior sensibilidade nos períodos críticos, pois associa à condição estrangulada do aquífero aluvionar, que recebe às águas de montante, à dinâmica dos níveis de água do Caneiro e à presença de barreiras ao fluxo provocadas pelos estacionamentos subterrâneos. O Caneiro proporciona uma elevada interacção entre as águas superficiais e subterrâneas, e as estruturas próximas afectam a dinâmica dos níveis piezométricos nessas áreas.

Esta ferramenta, uma vez calibrada, possibilita a simulação da inserção de obras subterrâneas e permite avaliar o impacto hidrogeológico acumulado, sobre a óptica de um sistema hidráulico subterrâneo e superficial integrado, assim como a simulação de medidas de mitigação. Esta abordagem de previsão, encontra-se em desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

À REFER (os dados e elementos aqui apresentados foram colhidos no âmbito de trabalhos desenvolvidos pelo LNEC para a REFER, sendo de propriedade da mesma).

À Fundação para a Ciência e a Tecnologia – FCT, Lisboa (Projecto de cooperação transnacional Portugal/Argentina: “Alterações do Ciclo Hidrológico e Gestão das Águas Subterrâneas” 2010/2011).

REFERÊNCIAS

- Anderson M.P. & Woessner W.W. (1992). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic Press. San Diego. 381p.
- 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 1:10000.
- GAPRES (2008). *Ligação Desnivelada da Linha de Cascais e do Porto de Lisboa à Linha de Cintura*. Relatório Factual (Definitivo). Ref^a 67/2008/08/GER-1080, Setembro de 2008. Lisboa, Portugal. 11 p.
- Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., McDonald, M. G. (2000). *MODFLOW-2000. The U.S. Geological Survey modular ground-water model-User Guide to modularization concepts and the ground-water flow process*. U.S. Geological Survey, Reston, VA, USA, 121 p.
- Leitão, T. E., Henriques, M. J., Mancuso, M. A., Ferreira, J. P. C. L., Novo, M. E. (2009). *Modelo matemático do escoamento subterrâneo no vale de Alcântara. 2.º Relatório de Progresso da Fase 2 - Monitorização hidrogeológica sazonal e aprofundamento do estudo do efeito da maré*. Relatório LNEC 222/2009 – NAS. Lisboa, Portugal. 47 p.
- Mancuso M. A., Ferreira, J. P. C. L., Oliveira, M. M., Novo M. E., Henriques M. J. (2008). *Modelo matemático do escoamento Subterrâneo no vale de Alcântara. Relatório Sectorial da Fase 1: Águas Subterrâneas*. Relatório LNEC 378/2008 – NAS. Lisboa, Portugal. 59 p.
- 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.
- Oliveira, M. M., Ferreira, J. P. C. L., Mancuso M. A., Novo, M. E., Henriques, M. J., (2008). *Modelo Matemático do Escoamento Subterrâneo no Vale de Alcântara. Relatório das Tarefas 1, 2, e 3.1*. Relatório LNEC 318/2008 – NAS. Lisboa, Portugal. 80 p.