

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



Ciências
ULisboa

**Impacte hidrogeológico associado à construção de obras
subterrâneas em zona aluvionar**

Carlos Thomas Arraiano Zungailia

Mestrado em Geologia Aplicada
Especialização em Hidrogeologia

Trabalho de Projeto orientado por:
Doutora Rute Isabel Henriqueto Ramos
Professora Doutora Maria do Rosário Carvalho

2020

Agradecimentos

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, na pessoa do Engenheiro Carlos Pina, por todos os meios disponibilizados para a realização desta dissertação, em especial à Eng.^a Laura Caldeira (Diretora do Departamento de Geotecnia), ao Dr. Filipe Telmo Jeremias (Chefe do Núcleo de Geologia de Engenharia e de Ambiente), e a toda a equipa do Núcleo de Geologia de Engenharia e de Ambiente pela forma tão calorosa como me receberam, e por me fazerem estar sempre à vontade.

À Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, pelos últimos seis anos, os melhores da minha vida.

À minha orientadora, a Dr. Rute Ramos, pela disponibilidade, interesse e apoio constante que sempre demonstrou ao longo do meu percurso. Aprendi tanto consigo, obrigado por tudo. Nunca pensei ter uma orientadora que, desde o primeiro dia, me acolheu de braços abertos e colocou tudo à minha disposição. Até ao último dia, esteve sempre tão presente, tão paciente, tão pronta para ajudar. Sem si, nada disto seria possível. Estarei para sempre grato.

À minha coorientadora, a Prof. Dr. Maria do Rosário Carvalho, a principal razão de eu ter escolhido a área de Hidrogeologia. Obrigado por ter sempre mostrado interesse no meu desenvolvimento académico, e pela ajuda inimaginável ao longo tanto da Licenciatura como do Mestrado. Tenho dúvidas que o meu caminho tivesse sido o mesmo sem a sua presença cativante.

À minha irmã, Rita, que, apesar de não trabalhar na área científica como os meus pais, é o meu exemplo de resiliência e fé.

À minha avó, Cândida, o meu modelo de coragem, bondade e superação, obrigado por tudo. És realmente uma segunda mãe.

À minha namorada, Matilde, por todo o carinho, paciência, apoio incondicional e presença incansável.

Aos meus pais, Edward e Cecília, obrigado por me terem incutido o interesse pela Ciência, e principalmente por me terem dado todas as ferramentas para tentar ser melhor profissional, mas mais importante, melhor pessoa. Pai, foste a minha grande inspiração para me tornar geólogo, e sempre serás o meu exemplo de profissionalismo. Mãe, o que seria de mim sem ti? Toda a tua experiência académica foi fulcral no meu desenvolvimento. Sempre me apoiaram em tudo, e sei que isso não deixará de acontecer. É um orgulho e um privilégio ser vosso filho.

Resumo

. As construções no subsolo interferem com a água subterrânea, no que respeita aos níveis de água, caudais de circulação, direções de escoamento e à qualidade da água. Como tal, e devido à crescente preocupação com potenciais inundações, várias administrações locais passaram a exigir a realização de estudos hidrogeológicos, principalmente nas áreas ribeirinhas, por forma a se evitar ou mitigar perturbações no escoamento subterrâneo decorrentes de construções subterrâneas.

O presente trabalho tem como principal objetivo a análise do impacto hidrogeológico causado pela construção de uma obra subterrânea numa zona aluvionar, com o recurso à modelação numérica tridimensional do fluxo subterrâneo utilizando o programa *Groundwater Modeling System*.

Os modelos numéricos de fluxo subterrâneo constituem uma ferramenta essencial na avaliação de alterações no regime hidrogeológico provocado por obras subterrâneas e na previsão de cenários futuros.

Dada a impossibilidade de analisar um caso de estudo real, definiu-se um caso de estudo teórico, com características geológicas e hidrogeológicas semelhantes às encontradas em zonas aluvionares da cidade de Lisboa, nomeadamente, depósitos superficiais (aterro, seguido de aluvião lodosa, aluvião arenosa e cascalheira de base) assentes sobre um substrato rochoso de natureza carbonatada.

A partir do caso de estudo definido, foi desenvolvido o respetivo modelo numérico e efetuadas as simulações representativas das fases de referência e definitiva da obra, em regime permanente, por forma a conseguir-se determinar o impacto hidrogeológico decorrente da construção de um edifício com uma cave.

Durante a fase de construção é necessário efetuar a extração de água afluyente ao fundo de escavação, por forma a manter as condições de segurança na obra. Assim, com o intuito de simular essa fase, de efetuar uma análise comparativa de diferentes condições para simular a extração de água e de determinar o caudal necessário extrair da zona de escavação para manter a obra a seco, procedeu-se à criação do modelo representativo da fase final de escavação. Foram consideradas três condições para representar a extração de água no fundo de escavação, designadamente, condição de potencial constante, condição de dreno, e por fim, condição de poço/furo de bombagem.

Pretendeu-se, igualmente, realizar uma análise de sensibilidade do impacto hidrogeológico relativo aos parâmetros hidráulicos e às condições de fronteira, com o intuito de determinar a influência dos mesmos no resultado do impacto hidrogeológico, tendo sido realizadas as seguintes simulações:

- Diminuição da condutividade hidráulica da camada de areia;
- Aumento da condutividade hidráulica da camada de areia;
- Diminuição da condutividade hidráulica do substrato rochoso;
- Aumento da condição de fronteira (potencial constante) de montante;
- Aumento da condição de fronteira (potencial constante) de jusante;
- Diminuição da condutividade hidráulica da areia e aumento da condição de fronteira (potencial constante) de montante.

Os resultados obtidos sugerem que, relativamente ao caso de estudo estabelecido, a construção do edifício não causa impacto significativo, ocorrendo subidas máximas do nível de água de 6 cm, a montante da estrutura enterrada. Com base nas simulações representativas da fase de escavação, verificou-se ser necessário extrair cerca de 1,6 a 1,7 L/s para se conseguir realizar esta obra a seco. Face às diferenças pouco significativas nos resultados obtidos com as diversas condições impostas no fundo de escavação, considera-se que a fase de escavação pode ser simulada utilizando qualquer uma das três

condições de fronteira estudadas. Finalmente, as análises de sensibilidade sugerem que o aumento do impacto hidrogeológico está diretamente relacionado com o aumento do caudal de circulação na zona de implantação do edifício, devido ao aumento do gradiente hidráulico ou à presença de materiais com permeabilidade elevada na zona de interseção da obra.

Face à crescente ocupação do espaço subterrâneo com estruturas impermeáveis, como caves e túneis, torna-se cada vez mais relevante a realização deste tipo de estudos.

Palavras-chave: Impacte hidrogeológico, estruturas impermeáveis, modelação numérica.

Abstract

Underground constructions interfere with groundwater, namely water levels, flow rates, flow directions and quality. Thus, due to increasing concerns of potential flooding, local administrations have begun requesting hydrogeological studies, mainly in riverside areas, in order to avoid or mitigate changes to groundwater flow conditions due to underground constructions.

The main goal of this work is the analysis of the hydrogeological impact caused by the construction of an underground structure, in an alluvial area, based on three-dimensional numerical modeling of groundwater flow, using the Groundwater Modeling System program.

Groundwater numerical models are essential for evaluating changes in the hydrogeological conditions caused by underground constructions and for forecasting future scenarios.

Given the impossibility of analyzing a real case study, a theoretical one was defined, with geological and hydrogeological characteristics similar to those found in alluvial areas in the city of Lisbon, namely superficial deposits (artificial fill (madeground), alluvial soft clay, alluvial sand and basal gravel) overlying a carbonate bedrock.

Then, a numerical model was developed and simulations representative of the initial and final phases of the construction work were carried out, in steady-state conditions, in order to determine the hydrogeological impact. During the excavation phase it is necessary to remove water that flows toward the excavation bottom, in order to maintain safety conditions at the construction site. Therefore, with the purpose of simulating this phase, of comparing the different conditions used to simulate water extraction, and of determining the flow rate required to pump, a representative model of the final phase of the excavation was created. Three conditions were considered to represent water extraction from the excavation bottom, namely, constant head condition, drain and well.

It was also intended to carry out a sensitivity analysis of the hydrogeological impact related to hydraulic parameters and boundary conditions, in order to evaluate their influence on the results, by performing the following simulations:

- Decrease of the hydraulic conductivity of the sand layer;
- Increase of the hydraulic conductivity of the sand layer;
- Decrease of the hydraulic conductivity of the bedrock;
- Increase of the upstream boundary condition (constant head);
- Increase of the downstream boundary condition (constant head);
- Decrease of the hydraulic conductivity of the sand and an Increase of the upstream boundary condition (constant head).

The results obtained suggest that, in relation to the case study, the construction of the basement does not cause a significant impact, with maximum rises in the water level of 6 cm, upstream of the impervious structure. Based on the simulations representative of the excavation phase, a flowrate of about 1,6 to 1,7 L/s is needed to be pumped in order to perform the excavation in dry conditions. In view of the small differences in the results obtained with the various conditions imposed on the excavation bottom, it is considered that the excavation phase can be simulated using any of the three boundary conditions applied. Finally, the sensitivity analysis suggests that the increase of the hydrogeological impact is directly related to the increase of the flow rate in the construction area, due to an increase of hydraulic gradient or the presence of materials with high hydraulic conductivity.

In view of the rising occupation of the subsoil with impervious structures, such as basements and tunnels, it is becoming increasingly relevant to carry out this type of study.

Keywords: Hydrogeological impact, impervious structures, numerical modeling.

Índice

I. Introdução	1
II. Modelação hidrogeológica.....	5
II.1. Princípios básicos do fluxo de água subterrânea	5
II.2. Modelação numérica.....	7
II.2.1. Método de diferenças finitas	7
II.2.2 Método de elementos finitos.....	8
II.3. Construção do Modelo.....	9
II.3.1 Condições iniciais	9
II.3.2. Condições de fronteira	10
II.3.3 Parâmetros Hidráulicos.....	11
II.3.4. Modelo em regime permanente e transitório	11
II.3.5 Calibração	12
III. Caraterização do caso de estudo teórico.....	14
IV. Metodologia	18
V. Resultados e Discussão.....	26
V.1. Análise do Impacte Hidrogeológico	26
V.1.1. Simulação da fase de referência (antes da construção)	26
V.1.2. Simulação da fase definitiva da obra (após a construção do edifício).....	31
V.2. Simulação da fase de escavação da obra	34
V.2.1. Simulação com condição de potencial constante no fundo de escavação	34
V.2.2. Simulação com a condição de dreno no fundo de escavação	35
V.2.3. Simulação com a condição de poço/furo de bombagem	40
V.3. Análise de sensibilidade	44
V.3.1. Diminuição da condutividade hidráulica da areia	44
V.3.2. Aumento da condutividade hidráulica da areia	48
V.3.3. Diminuição da condutividade hidráulica do substrato.....	53
V.3.4. Aumento da condição de fronteira de montante	58
V.3.5. Aumento da condição de fronteira de jusante.....	62
V.3.6. Diminuição da condutividade hidráulica da areia e aumento da condição de fronteira de montante	66
VI. Conclusão.....	72
Referências Bibliográficas	74

Índice de Figuras

Figura II. 1. Método de diferenças finitas (Oude Essink, 2001)	8
Figura II. 2. Método de elementos finitos (Oude Essink, 2001)	9
Figura III. 1. Caso de estudo teórico, com a localização das sondagens definidas.	14
Figura III. 2. Sequência litológica definida para o caso de estudo teórico.	15
Figura III. 3. Superfície piezométrica obtida para a aluvião (à esquerda) e para o substrato rochoso (à direita), através do método de interpolação inverso do quadrado das distâncias.	17
Figura IV. 1. Modelo geológico (em cima) e respetivo modelo numérico (em baixo) para o caso de estudo teórico	18
Figura IV. 2. Método Boundary matching. a) Modelo litológico inicial; b) Modelo numérico obtido através do algoritmo.	19
Figura IV. 3. Litologia de cada camada do modelo numérico	20
Figura IV. 4. Condições de fronteira introduzidas no modelo da fase de referência.	21
Figura IV. 5. Metodologia aplicada na análise de impacte hidrogeológico.	22
Figura IV. 6. Condições de fronteira de potencial hidráulico constante introduzidas no modelo da fase de escavação.	22
Figura IV. 7. Condição de potencial hidráulico constante no fundo de escavação, nas camadas 3, 4 e 5, respetivamente, para simulação da fase de escavação.	23
Figura IV. 8. Localização dos drenos nas simulações da fase de escavação: com 1 dreno (à esquerda) e dois drenos (à direita).	24
Figura IV. 9. Localização dos poços/furos no interior da obra.	24
Figura IV. 10. Metodologia aplicada para a simulação da fase de escavação.	24
Figura IV. 11. Metodologia aplicada na análise de sensibilidade aos parâmetros hidráulicos e às condições de fronteira.	25
Figura V. 1. Potencial hidráulico e direção de fluxo na camada 5, resultantes da calibração inicial do modelo da fase de referência (A), e litologia da camada correspondente (B).	26
Figura V. 2. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos da camada 5, resultantes da calibração final do modelo da fase de referência (A), e litologia da respetiva camada, com o zonamento adicional na areia (B). Localização dos perfis S-N e E-W indicados com linhas a preto.	28
Figura V. 3. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da calibração final do modelo da fase de referência; B) Perfil litológico correspondente.	30
Figura V. 4. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da calibração final do modelo da fase de referência; B) Perfil litológico correspondente.	30
Figura V. 5. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 2, resultantes da simulação numérica da fase definitiva da obra (A) e litologia da respetiva camada (B). Localização dos perfis S-N e E-W indicados com linhas a preto.	31
Figura V. 6. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva da obra; B) Perfil litológico correspondente.	32
Figura V. 7. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva da obra; B) Perfil litológico correspondente.	32
Figura V. 8. Diferença entre o potencial hidráulico obtido para a fase definitiva e o obtido para a fase de referência, na camada 2 do modelo, considerando contenção periférica até ao substrato rochoso.	33
Figura V. 9. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação numérica da fase de escavação, recorrendo à condição de potencial constante no fundo de escavação.	34

Figura V. 10. Perfil E-W do potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, recorrendo à condição de potencial constante no fundo de escavação. .	35
Figura V. 11. Perfil S-N do potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, recorrendo á condição de potencial constante no fundo de escavação. .	35
Figura V. 12. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, considerando um dreno (A) e litologia da respetiva camada (B)	36
Figura V. 13. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, considerando um dreno; B) Perfil litológico correspondente.	36
Figura V. 14. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, considerando um dreno; B) Perfil litológico correspondente.	37
Figura V. 15. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, recorrendo a dois drenos (A) e litologia da respetiva camada (B).....	38
Figura V. 16. Perfil E-W na zona do dreno D1. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, recorrendo a dois drenos; B) Perfil litológico correspondente.	38
Figura V. 17. Perfil S-N na zona do dreno D1. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, recorrendo a dois drenos; B) Perfil litológico correspondente.	39
Figura V. 18. Perfil E-W na zona do dreno D2. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, recorrendo a dois drenos; B) Perfil litológico correspondente.	39
Figura V. 19. Perfil S-N na zona do dreno D2. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, recorrendo a dois drenos; B) Perfil litológico correspondente.	40
Figura V. 20. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, recorrendo a dois poços de bombagem (A) e litologia da respetiva camada (B).	41
Figura V. 21. Perfil E-W na zona do poço de bombagem W1. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, considerando-se dois poços de bombagem; B) Perfil litológico correspondente.....	41
Figura V. 22. Perfil S-N na zona do poço de bombagem W1. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação, considerando-se dois poços de bombagem; B) Perfil litológico correspondente.	42
Figura V. 23. Perfil E-W na zona do poço de bombagem W2. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, considerando-se dois poços de bombagem; B) Perfil litológico correspondente.....	42
Figura V. 24. Perfil S-N na zona do poço de bombagem W2. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, considerando-se dois poços de bombagem; B) Perfil litológico correspondente.....	43
Figura V. 25. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando a areia uniforme e menos permeável (A) e litologia da respetiva camada (B).	44
Figura V. 26. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e velocidade fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando a areia uniforme e menos permeável; B) Perfil litológico correspondente.	45

Figura V. 27. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando a areia uniforme e menos permeável; B) Perfil litológico correspondente.	45
Figura V. 28. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 2, resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando a areia uniforme e menos permeável (A) e litologia da respectiva camada (B).	46
Figura V. 29. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva considerando a areia uniforme e menos permeável; B) Perfil litológico correspondente.	47
Figura V. 30. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando a areia uniforme e menos permeável; B) Perfil litológico correspondente.	47
Figura V. 31. Diferença entre o potencial hidráulico obtido na fase definitiva e o obtido na fase de referência na camada 2 do modelo, considerando a areia uniforme e menos permeável.	48
Figura V. 32. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando a areia uniforme e mais permeável (A) e litologia da respectiva camada (B).	49
Figura V. 33. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência considerando, a areia uniforme e mais permeável; B) Perfil litológico correspondente.	49
Figura V. 34. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando a areia uniforme e mais permeável; B) Perfil litológico correspondente.	50
Figura V. 35. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 2, resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando a areia uniforme e mais permeável (A) e litologia da respectiva camada (B).	51
Figura V. 36. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação da fase definitiva, considerando a areia uniforme e mais permeável; B) Perfil litológico correspondente.	52
Figura V. 37. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação da fase definitiva, considerando a areia uniforme e mais permeável; B) Perfil litológico correspondente.	52
Figura V. 38. Diferença entre o potencial hidráulico obtido na fase definitiva e o obtido na fase de referência na camada 2, considerando a areia uniforme e mais permeável.	53
Figura V. 39. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando o substrato menos permeável (A) e litologia da respectiva camada (B).	54
Figura V. 40. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando o substrato menos permeável; B) Perfil litológico correspondente.	55
Figura V. 41. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando o substrato menos permeável; B) Perfil litológico correspondente.	55
Figura V. 42. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 2, resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando o substrato menos permeável(A) e litologia da respectiva camada (B).	56
Figura V. 43. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando o substrato menos permeável; B) Perfil litológico correspondente. ...	56
Figura V. 44. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando o substrato menos permeável; B) Perfil litológico correspondente. ...	57

Figura V. 45. Diferença entre o potencial hidráulico obtido na fase definitiva e o obtido na fase de referência na camada 2 do modelo, considerando o substrato menos permeável.	57
Figura V. 46. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando o aumento da condição de fronteira de montante (A) e litologia da respectiva camada (B).	58
Figura V. 47. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando o aumento da condição de fronteira de montante; B) Perfil litológico correspondente.	59
Figura V. 48. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando o aumento da condição de fronteira de montante; B) Perfil litológico correspondente.	59
Figura V. 49. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 2, resultantes da simulação numérica da fase definitiva considerando o aumento da condição de fronteira de montante. (A) e litologia da respectiva camada (B).	60
Figura V. 50. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando o aumento da condição de fronteira de montante; B) Perfil litológico correspondente.	60
Figura V. 51. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando o aumento da condição de fronteira de montante; B) Perfil litológico correspondente.	61
Figura V. 52. Diferença entre o potencial hidráulica obtido na fase definitiva e o obtido na fase de referência na camada 2, considerando o aumento da condição de fronteira de montante.	61
Figura V. 53. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação da fase de referência, considerando o aumento da condição de fronteira de jusante. (A) e litologia da respectiva camada (B).	62
Figura V. 54. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação da fase de referência, considerando o aumento da condição de fronteira de jusante; B) Perfil litológico correspondente.	63
Figura V. 55. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação da fase de referência, considerando o aumento da condição de fronteira de jusante; b) Perfil litológico correspondente.	63
Figura V. 56. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação da fase definitiva, considerando o aumento da condição de fronteira de jusante (A) e litologia da respectiva camada (B).	64
Figura V. 57. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação da fase definitiva, considerando o aumento da condição de fronteira de jusante; B) Perfil litológico correspondente.	64
Figura V. 58. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação da fase definitiva, considerando o aumento da condição de fronteira de jusante; B) Perfil litológico correspondente.	65
Figura V. 59. Diferenças entre o potencial hidráulico obtido na simulação da fase definitiva e o obtido na simulação da fase de referência na camada 2, considerando o aumento da condição de fronteira de jusante.	65
Figura V. 60. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando a areia uniforme e menos permeável e condição de fronteira de montante mais elevada (A) e litologia da respectiva camada (B).	67

Figura V. 61. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência considerando a areia uniforme e menos permeável e condição de fronteira de montante mais elevada; B) Perfil litológico correspondente.....	67
Figura V. 62. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando a areia uniforme e menos permeável e condição de fronteira de montante mais elevada; B) Perfil litológico correspondente.....	68
Figura V. 63. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 2, resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando a areia uniforme e menos permeável e condição de fronteira de montante mais elevada (A) e litologia da respectiva camada (B).	68
Figura V. 64. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando a areia uniforme e menos permeável e condição de fronteira de montante mais elevada; B) perfil litológico correspondente.....	69
Figura V. 65. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva considerando a areia uniforme e menos permeável e condição de fronteira de montante mais elevada; B) Perfil litológico correspondente.....	69
Figura V. 66. Diferença entre o potencial hidráulico obtido na fase definitiva e o obtido na fase de referência na camada 2, considerando a areia uniforme e menos permeável e condição de fronteira de montante mais elevada.	70

Índice de Tabelas

Tabela III. 1. Sequência litológica definida para cada sondagem	14
Tabela III. 2. Características dos ensaios de absorção de água definidos para o caso de estudo teórico. 16	
Tabela III. 3. Características dos piezômetros definidos para o caso de estudo teórico.	16
Tabela V. 1. Condutividades hidráulicas obtidas da calibração inicial do modelo da fase de referência.	27
Tabela V. 2, Comparação entre os potenciais hidráulicos “observados” nos piezômetros e calculados pelo modelo, resultantes da calibração inicial do modelo da fase de referência..	27
Tabela V. 3. Condutividades hidráulicas obtidas na calibração final do modelo da fase de referência. 28	
Tabela V. 4. Comparação entre os potenciais hidráulicos observados e os calculados após a calibração final do modelo numérico da fase de referência.....	29
Tabela V. 5. Erros associados à calibração final do modelo numérico da fase de referência.	29
Tabela V. 6. Quadro-resumo dos resultados obtidos para o caso de estudo teórico.....	33
Tabela V. 7. Tabela comparativa dos resultados obtidos nas simulações representativas da fase final de escavação.....	43
Tabela V. 8. Condutividades hidráulicas introduzidas no modelo numérico da fase de referência considerando a areia uniforme e menos permeável.....	46
Tabela V. 9. Condutividades hidráulicas introduzidas no modelo da fase de referência, considerando a areia uniforme e mais permeável.....	50
Tabela V. 10. Condutividades hidráulicas introduzidas no modelo numérico da fase de referência, considerando o substrato menos permeável.	54
Tabela V. 11. Condutividades hidráulicas introduzidas no modelo numérico da fase de referência considerando a areia uniforme e menos permeável e condição de fronteira de montante mais elevada.	66
Tabela V. 12. Quadro-resumo das análises de sensibilidade efetuadas.....	71

I. Introdução

Ao longo dos últimos anos, devido ao desenvolvimento das áreas urbanas, tem-se verificado um aumento da ocupação subterrânea com estruturas impermeáveis, como por exemplo caves e túneis. Estas estruturas interferem com a água subterrânea, nomeadamente no que diz respeito à cota dos níveis de água, à qualidade da mesma, ao caudal de circulação e à direção de escoamento, em consequência do efeito barreira produzido pela sua presença.

Devido à crescente preocupação relativa ao risco de inundação causado pela ocupação do subsolo, as administrações locais passaram a exigir, na última década, nos Planos Municipais de Ordenamento de Território (Plano Diretor Municipal, Planos de Urbanização e Planos de Pormenor) a realização de estudos hidrogeológicos, bem como a comprovação de que as soluções de engenharia projetadas não causam impactes no escoamento subterrâneo, em especial em zonas ribeirinhas sujeitas ao efeito da maré. Como exemplos tem-se o Plano de Pormenor do Aterro da Boavista e o Plano de Urbanização de Alcântara, para a região de Lisboa.

Quando as estruturas subterrâneas intersectam os aquíferos, estas comportam-se como barreiras contra o fluxo natural da água subterrânea, podendo causar impactes ambientais e económicos significativos (Vazquez-Sune *et al.*, 2004). De acordo com Pujades *et al.* (2012), o efeito barreira é definido pelo aumento da perda de carga hidráulica ao longo das linhas de fluxo, motivado pela diminuição da condutância devido à construção de uma estrutura subterrânea.

As estruturas impermeáveis produzem modificações no escoamento subterrâneo, em consequência da redução total ou parcial da secção dos aquíferos. Ocorre, assim, uma diminuição da transmissividade nos aquíferos, responsável pela subida do nível de água a montante das estruturas e pela descida a jusante das mesmas (Ricci *et al.*, 2007). Estas alterações do nível de água podem resultar em consequências negativas para o ambiente e para pessoas e bens, considerando-se importante não só avaliar os impactes durante a fase de construção, mas também os efeitos a longo prazo que as estruturas impermeáveis podem produzir nos aquíferos.

A subida do nível de água, a montante das estruturas enterradas, pode causar inundações em caves (Paris *et al.*, 2010) e promover salinização dos solos ou afetar a flora devido ao apodrecimento das raízes das plantas (Tambara *et al.*, 2003). Outros impactos associados à subida do nível de água incluem a diminuição da capacidade de carga de fundações superficiais, a expansão de solos compactados debaixo de fundações, a ocorrência de assentamentos em solos pouco compactados após saturação, o aumento da necessidade de drenagem nas zonas sujeitas a escavações e a propagação de contaminantes (Marinos e Kavvadas, 1997).

Por sua vez, a descida dos níveis de água, a jusante das estruturas enterradas, pode induzir o aumento de intrusão salina nos aquíferos costeiros, a cedência de terrenos e a secagem de poços e nascentes (Custodio e Carrera, 1989; Tambara *et al.*, 2003).

Existem, no entanto, medidas adicionais que podem ser implementadas durante ou após a construção de uma obra subterrânea, por forma a minimizar os impactes provocados pela mesma, que, de uma forma geral, consistem na recolha/drenagem de água a montante e na respetiva descarga da água a jusante da estrutura impermeável (Kusumoto *et al.*, 2003).

Para a resolução de problemas relacionados com água subterrânea recorre-se a modelos hidrogeológicos, que de acordo com Kresic (2006) são utilizados com três objetivos principais:

- prever alterações que irão ocorrer num determinado aquífero;

- descrever um sistema com o intuito de analisar vários pressupostos sobre a sua natureza e dinâmica;
- criar um sistema hipotético para estudar princípios do fluxo de água subterrânea associados a problemas gerais ou específicos.

Em geral, um modelo simula as propriedades em termos espaciais e temporais de um sistema, ou de uma das suas partes, podendo subdividir-se em modelos físicos, analógicos e matemáticos.

Um exemplo de um modelo físico, em hidrogeologia, tem-se, de forma simplista, o chamado “modelo da caixa de areia”, que consiste, por exemplo, num tanque preenchido com areia e saturado em água, por forma a simular um aquífero poroso de extensão reduzida. Estes modelos são bastante limitados devido à dificuldade em conseguir simular aquíferos multicamada, expostos a vários fatores como precipitação, escorrência superficial, drenância vertical, e a problemas associados a alterações da sua geometria e variações nos parâmetros hidráulicos (Kresic, 2006).

Um sistema hidrogeológico pode ser, igualmente, simulado recorrendo à analogia entre o fluxo de água subterrânea e outros processos físicos semelhantes, como por exemplo o fluxo de corrente elétrica através de um condutor. Para este exemplo, a analogia baseia-se na semelhança entre a Lei de Darcy, que determina o escoamento subterrâneo, e a Lei de Ohm, que define o fluxo elétrico. Estes modelos são denominados de analógicos e eram muito utilizados antes do rápido desenvolvimentos dos computadores (Wang e Anderson, 1995).

Os modelos que recorrem a equações matemáticas para descrever o fluxo subterrâneo são designados de matemáticos. Segundo Kresic (2006), dependendo da natureza das equações envolvidas, este tipo de modelos subdivide-se em:

- Empíricos (experimentais);
- Probabilísticos;
- Determinísticos.

Os modelos empíricos baseiam-se no ajuste de dados experimentais a uma função matemática. Por sua vez, os modelos probabilísticos são baseados nas leis de probabilidade e estatística, necessitando de grandes quantidades de dados para identificação de parâmetros e não podendo, deste modo, ser utilizados para responder a muitos dos problemas que se colocam em hidrogeologia, como por exemplo, prever os efeitos de futuras extrações de água. Finalmente, os modelos determinísticos assumem que o comportamento do sistema em estudo (aquífero) é determinado pelas leis da física que governam o fluxo de água subterrânea. Muitos dos problemas relacionados com hidrogeologia são resolvidos recorrendo a este tipo de modelos, existindo, de acordo com Kresic (2006), dois grandes grupos que se distinguem pelas equações matemáticas envolvidas, nomeadamente:

- Analíticos
- Numéricos

Os modelos analíticos resolvem uma equação de fluxo de cada vez, podendo o resultado ser aplicado a um ponto ou conjunto de pontos na zona de estudo. Por exemplo, para determinar o rebaixamento a uma determinada distância de um furo, após um determinado período de tempo, recorre-se a uma das equações que descreve o fluxo na direção do furo. No entanto, se o aquífero não for homogéneo, as soluções são aplicáveis apenas a uma distância radial limitada do furo. Assim, quanto mais heterogéneo for o aquífero, quanto maior for o número de fronteiras e de furos existentes, mais difícil será aplicar o método analítico (Kresic, 2006).

Os modelos numéricos descrevem o fluxo de uma área de estudo em simultâneo, fornecendo resultados para todos os pontos especificados pelo utilizador. A solução representa a distribuição do potencial hidráulico nos pontos que representam células ou elementos individuais.

Para a avaliação do potencial impacto hidrogeológico provocado pelas construções subterrâneas recorre-se, habitualmente, a modelos numéricos (bidimensionais ou tridimensionais) de diferenças-finitas ou elementos-finitos, uma vez que estes permitem quantificar variações do potencial hidráulico e projetar as soluções de engenharia (Merrick e Jewell, 2003; Bonomi e Bellini, 2003; Ricci *et al.*, 2007; Paris *et al.*, 2010).

Os modelos numéricos são utilizados em diversas situações, como por exemplo para a construção de túneis e minas. A construção de túneis em áreas urbanas implica uma caracterização rigorosa do subsolo, de forma a minimizar riscos durante a escavação. A inesperada entrada de grandes caudais de água, aliada à presença de solos moles, representa um grande problema durante a construção, pois pode resultar no colapso do túnel e afetar as estruturas superficiais. A água pode arrastar grandes quantidades de materiais, provocando instabilidade e colapsos. São vários os autores que analisaram o fluxo de água subterrânea relacionado com a construção de túneis, com o intuito de prever impactes (Yang *et al.*, 2009; Font-Capó *et al.*, 2011; Zarei *et al.*, 2011; Pujades *et al.*, 2015)

Os modelos numéricos são também uma ferramenta importante para resolver os vários problemas relacionados com água subterrânea associados tanto com o processo de mineração como com o fecho de uma mina (Rapantova *et al.*, 2007). Estratégias de extração de água eficazes devem ser desenvolvidas por forma a minimizar o custo operacional e reduzir o impacto que a extração de água nas minas pode ter no comportamento regional da água subterrânea. Durante a escavação de uma mina é necessário determinar os caudais de extração para manter a atividade extrativa a seco. Nos últimos anos, a modelação numérica de fluxo subterrâneo tornou-se numa ferramenta muito importante para a legislação de segurança em minas, de forma a minimizar infiltrações significativas de água. Muitos investigadores recorreram, com sucesso, a modelos numéricos para estimar as entradas de água em minas (Bayer *et al.*, 2009; Surinaidu *et al.*, 2014; Liang *et al.*, 2017).

A construção dos modelos numéricos requer um conhecimento sobre as condições geológicas e hidrogeológicas das áreas intersetadas pelas obras, por forma a conseguir-se simular o melhor possível as condições existentes nesses locais. No entanto, em diversos casos os estudos hidrogeológicos realizados durante as campanhas de reconhecimento dos locais apresentam pouca informação, e, portanto, durante a calibração dos níveis de água é, frequentemente, necessário assumir parâmetros de entrada no modelo (como propriedades hidráulicas dos materiais geológicos) e condições de fronteira, cujos valores têm influência na solução final do modelo. Por outro lado, os programas de modelação hidrogeológica disponibilizam várias opções para simular as condições de fronteira, cuja seleção nem sempre é um processo simples e pode interferir no resultado obtido.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o impacto hidrogeológico causado pela construção de uma obra subterrânea numa zona aluvionar, nomeadamente no que diz respeito a modificações na direção de escoamento e a variações na cota dos níveis de água a montante e a jusante da estrutura impermeável enterrada. Pretende-se, igualmente, efetuar uma análise comparativa de diversas funcionalidades do programa de modelação numérica utilizado (*Groundwater Modeling System*), para simular a fase final da escavação, bem como realizar uma análise de sensibilidade aos parâmetros hidráulicos e a condições de fronteira, por forma a determinar a influência dos mesmos no resultado do impacto hidrogeológico. Para além dos objetivos expostos anteriormente, este trabalho contribui, ainda, para o desenvolvimento de competências na criação de modelos numéricos tridimensionais do escoamento subterrâneo relacionados com obras geotécnicas.

Este trabalho apresenta seis capítulos, em que o primeiro corresponde à introdução, onde é feito um enquadramento geral do tema e a problemática do mesmo, e onde são definidos os objetivos. O segundo capítulo é referente aos conceitos básicos de modelação hidrogeológica. O terceiro capítulo contém a caracterização do caso de estudo teórico. O quarto capítulo diz respeito à metodologia aplicada no presente trabalho, para a criação dos modelos tridimensionais de fluxo subterrâneo. O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos e a discussão dos mesmos. O sexto capítulo contém as conclusões obtidas no presente trabalho. Por último, são apresentadas as referências bibliográficas.

II. Modelação hidrogeológica

A modelação hidrogeológica é, atualmente, uma ferramenta importante na maioria dos projetos relacionados com a gestão, a proteção e a remediação de água subterrânea (Kresic, 2006). É, contudo, essencial para o uso e interpretação adequada dos modelos, reconhecer as suas limitações. As limitações podem ser técnicas, como a precisão dos cálculos, e humanas, pois o modelo baseia-se em várias suposições sobre o sistema natural (Kresic, 2006).

Um modelo terá, assim, um grau variado de confiança, que depende dos pressupostos assumidos pelo utilizador e dos parâmetros hidráulicos introduzidos.

II.1. Princípios básicos do fluxo de água subterrânea

O fluxo de água subterrânea na zona saturada está em constante movimento numa determinada direção tridimensional, devido aos seguintes fatores:

- Porosidade efetiva que permite fluxo por gravidade, sendo a formação geológica permeável. Se o fluxo de água devido à força da gravidade for desprezável quando comparado ao movimento de solutos por difusão, então a rocha não é permeável.

$$n_e = \frac{V_v}{V} \quad \text{Equação II. 1}$$

Em que n_e corresponde à porosidade efetiva, V_v ao volume de vazios, e V ao volume total (volume de poros e volume de vazios).

- Presença de gradiente hidráulico (i) na direção tridimensional, que consiste na diferença do potencial hidráulico entre pontos da mesma direção.

$$i = \frac{\Delta h}{l} \quad \text{Equação II. 2}$$

Em que Δh corresponde à variação do potencial hidráulico entre dois pontos de observação e l à distância entre os mesmos.

Uma simples analogia é o fluxo de água através de tubos ou canais abertos. A água irá mover-se se as pressões hidráulicas nas duas extremidades do tubo forem distintas, ou se a altura/cota de uma extremidade do canal aberto for superior à altura/cota da outra extremidade. Se nenhum dos dois se confirmar, a água não se movimentará. A água flui do ponto de maior pressão para o ponto de menor pressão, sendo esta pressão chamada de potencial hidráulico. À medida que a água subterrânea flui de um ponto para outro, perde energia devido à fricção entre partículas de água e o meio poroso. O gradiente hidráulico entre dois pontos de observação é obtido quando se divide a diferença de potencial hidráulico pela distância entre os dois pontos de observação (Kresic, 2006).

Medir potenciais hidráulicos e conseqüentemente gradientes hidráulicos e direções de fluxo requer planeamento. O número de pontos de observação, as suas profundidades, a dimensão da câmara de tomada de pressão e a frequência com que o nível de água é medido irá variar consoante o objetivo do estudo.

Durante o planeamento do sistema de observação, deve-se ter em consideração os seguintes aspetos:

- O potencial hidráulico varia de acordo com a recarga do aquífero;
- O potencial hidráulico em aquíferos confinados varia em resposta a flutuações de pressão;
- O potencial hidráulico em aquífero costeiros varia com a maré;
- O potencial hidráulico pode variar em resposta a stresses que ocorram no aquífero, como por exemplo extrações em furos nas proximidades.

O engenheiro francês Henry Darcy foi o primeiro a analisar quantitativamente o fluxo de água através de areia, sendo a sua descoberta a base dos estudos do fluxo de água subterrânea em meios porosos. Baseando-se em inúmeros testes em areias siliciosas, com variações nas condições hidráulicas, Darcy estabeleceu a seguinte relação quantitativa, atualmente conhecida como Lei de Darcy (Kresic, 2006).

$$Q = KA \frac{\Delta h}{l} \quad [m^3/s] \quad \text{Equação II. 3}$$

Esta lei indica que o fluxo de água (Q em m^3/s) através de uma amostra de areia é diretamente proporcional à secção transversal ao fluxo (A em m^2) e à perda de potencial hidráulico entre dois pontos de observação (Δh em m), e inversamente proporcional à distância entre os pontos (l em m). K é a constante de proporcionalidade da lei, designada de condutividade hidráulica, tendo unidades de velocidade (m/s). A equação hidráulica geral do fluxo contínuo, que resulta do princípio da conservação de massa, é a seguinte:

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 = \text{constante} \quad \text{Equação II. 4}$$

Esta equação indica que o caudal de água (Q) através das secções transversais A_1 e A_2 à velocidade v_1 e v_2 é o mesmo.

A velocidade do fluxo de água subterrânea (v), como definido pela lei de Darcy, é o produto da condutividade hidráulica (K) e o gradiente hidráulico (i).

$$v = k \times i \quad [m/s] \quad \text{Equação II. 5}$$

Contudo, esta velocidade, denominada de velocidade de Darcy, não corresponde à velocidade real a que as partículas de água se movem no meio poroso. A lei de Darcy assume que o fluxo de água subterrânea atravessa toda a área da secção de uma amostra (meio poroso), incluindo tanto vazios como partículas sólidas, no entanto, o fluxo de água ocorre apenas nos vazios.

Por forma a preservar o princípio da continuidade do fluxo (não há ganhos nem perdas de água), foi definida uma nova velocidade equivalente que descreve o fluxo através da secção transversal dos vazios.

$$v \times A = v_L \times A_V \quad \text{Equação II. 6}$$

Em que v_L é a nova velocidade de fluxo, designada de velocidade linear. Uma vez que a secção transversal ao fluxo é menor que a área total ($A_V < A$), a velocidade linear será superior à velocidade de Darcy. A Equação II.6 também pode ser escrita da seguinte forma:

$$v = v_L \times \frac{A_V}{A} \quad \text{Equação II. 7}$$

Multiplicando as áreas na Equação II.7 pela espessura do aquífero, obtém-se o seguinte:

$$v = v_L x \frac{V_v}{V} \quad \text{Equação II. 8}$$

Em que V_v corresponde ao volume de vazios interligados que permitem fluxo de água por gravidade, e V ao volume total. A razão entre os dois volumes pode ser observada na Equação II.1.

Combinando a Equação II.1 com a Equação II.8, obtém-se a equação para a velocidade linear (Equação II.9).

$$v_L = \frac{v}{n_e} \quad \text{Equação II. 9}$$

Por fim, recorrendo à Lei de Darcy (Equação II.5), obtém-se a seguinte dedução:

$$v_L = \frac{K x i}{n_e} \quad \text{Equação II. 10}$$

A velocidade linear apresenta uma maior precisão para estimar o tempo médio de deslocação da água subterrânea, e a velocidade de Darcy para calcular os caudais. Contudo, nenhuma velocidade corresponde à velocidade real da água subterrânea, que corresponde ao tempo de viagem de uma partícula de água através dos vazios (Kresic, 2006).

II.2. Modelação numérica

A modelação numérica é usada para resolver equações diferenciais parciais que representam o fluxo de água subterrânea. A área de interesse é subdividida em áreas mais pequenas (células) e a equação de fluxo subterrâneo é resolvida para cada célula, considerando o balanço hídrico (entradas e saídas). A solução dos modelos numéricos representa a distribuição dos potenciais hidráulicos nos pontos que representam células individuais. A equação diferencial de fluxo em cada célula é, então, substituída (aproximadamente) por uma equação algébrica, de forma a que o fluxo em toda a área de estudo seja representado por x equações e x incógnitas, em que x representa o número de células (Kresic, 2006). Este sistema de equações algébricas é resolvido numericamente, através de um processo iterativo.

Com base nos vários métodos de aproximação de equações diferenciais de fluxo, e nos métodos utilizados para resolver numericamente o sistema de equações algébricas resultante, os modelos numéricos podem ser divididos em vários grupos, sendo os mais utilizados:

- Modelos numéricos de diferenças finitas
- Modelos numéricos de elementos finitos

Ambos têm vantagens e desvantagens e para determinados problemas um pode ser mais apropriado que o outro.

II.2.1. Método de diferenças finitas

O método de diferenças finitas (Figura II.1) é uma técnica de solução numérica, que, apesar das suas limitações, ainda é muito utilizada devido à facilidade na sua programação. A base do método consiste na substituição de expressões diferenciais por quocientes de diferenças. O numerador desse quociente são as diferenças que incluem os valores das incógnitas (Bundschuh e Suárez Arriaga *et al.*, 2010). Assim, a solução da equação diferencial parcial é efetuada por meio de um sistema de equações algébricas que pode ser resolvido usando técnicas iterativas.

Por forma a criar um modelo deste género, a área a ser modelada deve ser espacialmente

discretizada. Para tal, divide-se a área do modelo num número finito de células retangulares ou quadradas, às quais são atribuídas propriedades hidráulicas. No centro de cada uma destas células, está presente um nó, caracterizado por (i, j, k) , em que i representa o número da célula na direção y , ou seja, o número da linha, e j representa na direção x , ou seja, o número da coluna. O tempo também é discretizado num número finito de intervalos, sendo representado por t . Num dado nó (i, j) e no tempo t , o potencial hidráulico é representado pelo valor h , a concentração de solutos dissolvidos por C , e a temperatura por T (Bundschuh e Suárez Arriaga, 2010). Em qualquer nó pode ser determinado o potencial hidráulico, a velocidade do fluxo (fluxo de Darcy) e a concentração de um soluto ou temperatura.

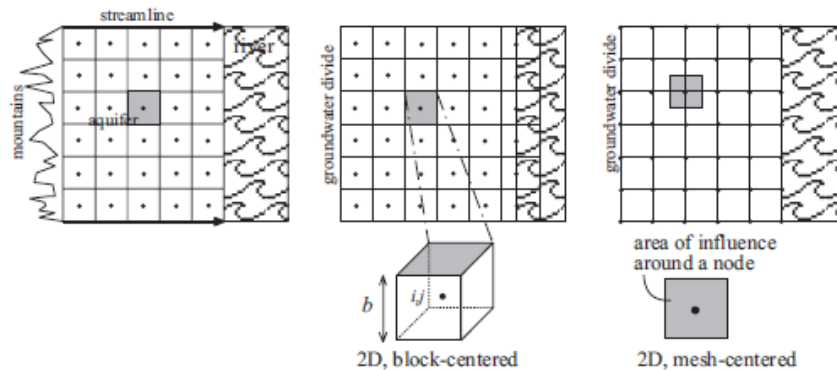


Figura II. 1. Método de diferenças finitas (Oude Essink, 2001)

II.2.2 Método de elementos finitos

O método dos elementos finitos (Figura II. 2) é a técnica numérica mais utilizada para resolver, aproximadamente, modelos matemáticos em equações diferenciais parciais.

Weisstein (2003) define este método como um método para resolver uma equação aproximando valores contínuos como um conjunto de valores em pontos discretos, espaçados regularmente por uma malha. Estes métodos são ferramentas extremamente úteis para resolver problemas importantes de transferência de calor, mecânica de fluidos e sistemas mecânicos, devido à sua facilidade em se adaptar a problemas de grande complexidade e a geometrias irregulares.

O conceito básico reside na subdivisão da área do modelo matemático em componentes separados e não sobrepostos, de geometria simples, como por exemplo triângulos ou retângulos, denominados de elementos finitos. A resposta de cada elemento é expressa em termos de um número finito de graus de liberdade caracterizado pelo valor de uma função desconhecida num conjunto de pontos nodais. As equações de equilíbrio e as considerações físicas são aplicadas a cada elemento usando métodos de interpolação simples, sendo construído um sistema de equações lineares.

Embora seja um método aproximado, a sua precisão pode ser melhorada, refinando a malha no modelo usando mais elementos e nós e recorrendo a melhores técnicas de interpolação.

Estes métodos são usados em hidrogeologia para calcular aproximadamente a distribuição de funções desconhecidas (pressão, temperatura, velocidade de fluxo) no domínio espacial ocupado pelo aquífero.

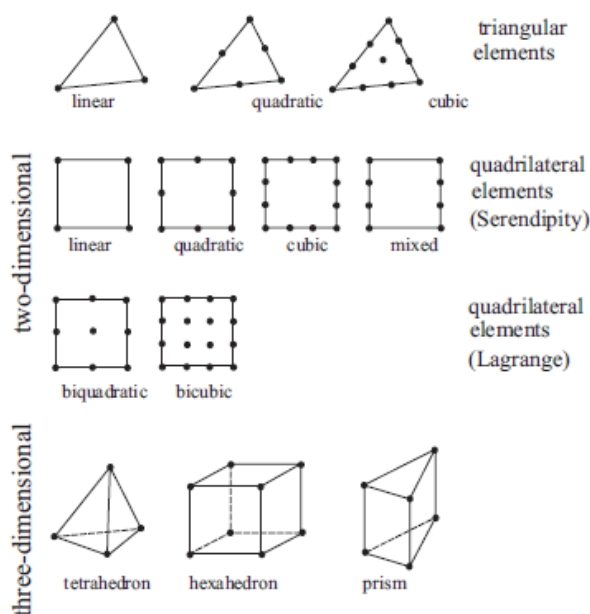


Figura II. 2. Método de elementos finitos (Oude Essink, 2001)

II.3. Construção do Modelo

Para ambos os métodos anteriormente descritos, após a definição do modelo conceptual da área de estudo, é necessário introduzir as condições iniciais, as condições de fronteira e os parâmetros hidráulicos. É igualmente importante proceder à calibração, de modo a que os resultados calculados no modelo sejam semelhantes aos níveis de água medidos em pontos de observação.

II.3.1 Condições iniciais

As condições iniciais consistem na distribuição dos potenciais hidráulicos (*starting heads*) no instante inicial da modelação, sendo especialmente importantes para simular em regime transitório. São, portanto, valores de potencial hidráulico para cada célula ativa e constante no modelo.

Um erro muito comum associado à configuração do topo e da base das células do modelo, é quando a condição inicial (designada para todas as células do modelo pelo utilizador) é colocada abaixo do limite inferior de uma ou mais células (Kresic, 2006). Embora muitas vezes não seja problemático em regime permanente, podem ocorrer problemas de instabilidade no modelo (Kresic, 2006).

Deve-se colocar, portanto, potenciais hidráulicos, tanto em regime permanente como em transitório, a cotas próximas dos valores observados no campo. Isto diminuirá o tempo de execução do modelo e resultará na convergência da solução, desde que os outros parâmetros também se aproximem dos dados observados em campo.

Depois do modelo ser calibrado, o resultado da distribuição dos potenciais hidráulicos pode ser utilizado como condição inicial em modelos de previsão.

II.3.2. Condições de fronteira

Para além de condições iniciais, os modelos matemáticos também necessitam de condições de fronteira, cujas equações irão definir o caudal ou o potencial hidráulico no limite do domínio do problema. Selecionar adequadamente estas condições é uma das etapas mais críticas na criação do modelo, pois a introdução de limites desajustados pode levar a resultados erróneos (Oude Essink, 2001).

As condições de fronteira representam barreiras físicas e hidráulicas que delimitam o modelo. As barreiras físicas são, por exemplo, limites geológicos e corpos de água superficiais, como rios ou lagos, enquanto as barreiras hidráulicas resultam de condições hidrogeológicas não visíveis, que se podem alterar com o tempo (Kresic, 2006).

Matematicamente, as condições de fronteiras são divididas em três tipos:

- Condição de Dirichlet (fronteira de potencial hidráulico especificado)

Esta condição descreve fronteiras de potencial especificado para as quais um potencial é definido. Como exemplos destas fronteiras tem-se o nível da água num lago ou no mar.

Representa, basicamente, uma fonte de água inesgotável, uma vez que o potencial hidráulico permanece constante ao longo do tempo. Por exemplo, a água pode ser extraída ou descarregada na fronteira sem alterar o seu potencial hidráulico.

Em algumas situações, contudo, pode ser uma aproximação irrealista da resposta do sistema.

- Condição de Neumann (fronteira de caudal especificado)

Esta condição descreve fronteiras de caudal especificado, para a qual um caudal (derivado do potencial) é definido para a fronteira, e que permanece constante ao longo do tempo.

Exemplos disso são a recarga natural de água subterrânea num aquífero, poços de injeção ou de extração de água, e a infiltração num sistema hidrológico (Oude Essink, 2001).

Uma condição especial de Neumann é a condição de fronteira sem fluxo ($Q=0$ m³/s), sendo este especificado como zero, como por exemplo numa zona de falha impermeável, ou numa zona de separação de bacias hidrográficas.

- Condição de Cauchy (condição de fluxo dependente do potencial hidráulico)

Esta condição descreve fronteiras de fluxo dependentes do potencial hidráulico, para o qual o fluxo que atravessa a fronteira é calculado para um determinado valor do potencial hidráulico na fronteira. Esta condição também é denominada de condição de fronteira mista, pois relaciona fronteiras de fluxo com fronteiras de potencial hidráulico.

Depende da diferença entre o potencial hidráulico especificado, definido pelo utilizador, num lado da fronteira, e o potencial hidráulico calculado pelo modelo do outro lado da fronteira.

Como exemplo deste tipo de fronteira tem-se a drenância de/para um rio, lago ou reservatório e a evapotranspiração, extração de água num furo de captação ou fluxo em direção a um dreno (Oude Essink, 2001).

II.3.3 Parâmetros Hidráulicos

Para se iniciar o processo de modelação numérica de fluxo subterrâneo é necessário introduzir parâmetros hidráulicos, tais como: condutividade hidráulica, transmissividade, coeficiente de armazenamento e porosidade. Salienta-se que alguns destes parâmetros são utilizados apenas para simulações em regime transitório.

A condutividade hidráulica (K) num meio saturado representa o coeficiente de proporcionalidade na lei de Darcy e indica a facilidade ou não de um aquífero se tornar num condutor hidráulico, permitindo a passagem de água ou de qualquer outro fluido, com maior ou menor velocidade.

A condutividade hidráulica é, muitas vezes, o parâmetro da modelação mais crítico e sensível, devendo considerar-se valores o mais realistas possível, de preferência obtidos através de ensaios de bombagem.

A condutividade hidráulica é necessária para simular condições de aquífero livre (não confinado), e o utilizador pode especificar transmissividades para condições confinadas. Também é possível calcular a transmissividade para uma camada de qualquer tipo, multiplicando a condutividade hidráulica pela espessura da camada derivada do topo e base da camada.

A menos que seja determinada com precisão nos ensaios de bombagem, a condutividade hidráulica vertical normalmente é assumida e calibrada de acordo com o utilizador, admitindo-se que a condutividade hidráulica vertical é inferior à condutividade hidráulica horizontal.

O coeficiente de armazenamento (adimensional) para camadas confinadas, e a cedência específica para camadas não confinadas, são necessários apenas em simulações em regime transitório. O coeficiente de armazenamento corresponde ao produto da espessura da camada com o armazenamento específico. Os ensaios de bombagem em aquíferos livres fornecem valores de cedência específica (adimensional) que são várias ordens de grandeza superiores ao coeficiente de armazenamento.

A porosidade representa a razão entre o volume de vazios e o volume total de um aquífero, variando conforme o material, o arranjo das partículas, o tipo e o tamanho das partículas. A porosidade efetiva corresponde à razão entre o volume de poros ligados entre si, permitindo circulação de água, e o volume total de um aquífero. A porosidade efetiva é necessária apenas se o modelo for usado em conjunto com outros programas que usam resultados gerados pelo Modflow para calcular a velocidade linear média de fluxo de águas subterrâneas. Essa velocidade é necessária para localizar as partículas de água à medida que elas se movem pelo meio poroso, e para calcular concentrações de contaminantes.

II.3.4. Modelo em regime permanente e transitório

Os modelos numéricos podem ser simulados em regime permanente ou transitório.

Num modelo em regime permanente, os parâmetros hidráulicos, os potenciais hidráulicos calculados e os fluxos são constantes ao longo do tempo. Uma solução em regime permanente é, muitas vezes, suficiente para abordar vários objetivos, como por exemplo analisar padrões de fluxo de água subterrânea e velocidades do mesmo, calcular gradientes regionais, ou simular direções de fluxo influenciadas por bombagem a longo prazo (Anderson, M.P. *et al*, 2015). Além disso, um modelo em regime permanente é normalmente a primeira etapa na modelação em regime transitório, pois estes recorrem a soluções em regime permanente como condições iniciais.

Os modelos numéricos que são resolvidos iterativamente necessitam de condições iniciais

(*starting heads*) em todos os nós no início de uma simulação em regime permanente. Estas condições iniciais influenciam o número de iterações necessárias para a convergência da solução, mas, na maioria dos casos, a solução final em regime permanente não depende dos valores das condições iniciais, desde que a solução tenha convergido adequadamente. Quanto mais próximas as condições iniciais estiverem da solução final, menos iterações serão necessárias. As condições de fronteira em regime permanente também não dependem do fator tempo, tal como as propriedades dos materiais e os parâmetros hidráulicos.

A maioria dos modelos em regime permanente são calibrados, recorrendo a observações medidas em campo, tipicamente potenciais hidráulicos e fluxos. Durante a calibração deve-se comparar as observações medidas em campo com os potenciais hidráulicos simulados em regime permanente. Contudo, é necessário ter em conta que os valores medidos nos sistemas aquíferos estão raramente em regime permanente, pois os níveis de água mudam em resposta a mudanças em recargas e descargas naturais e induzidas (Anderson, M.P. *et al*, 2015).

Os modelos em regime permanente são inerentemente mais simples de criar, executar e processar que os modelos em regime transitório, pois precisam apenas de um conjunto de dados calibrados e produzem apenas um conjunto de resultados. Os modelos em regime transitório necessitam de vários conjuntos de dados calibrados e produzem mais “outputs” que os em regime permanente, calculando potenciais hidráulicos para cada passo. Os modelos em regime transitório também necessitam de mais parâmetros hidráulicos, nomeadamente valores para parâmetros de armazenamento e condições iniciais, como por exemplo, para analisar variações do nível de água em resposta à entrada de água em furos de bombagem (Anderson, M.P. *et al*, 2015).

Tanto em regime permanente como em regime transitório, é necessário discretizar a malha do modelo, no entanto, na simulação em regime transitório também é necessário discretizar o fator tempo.

A seleção do tipo de regime de simulação é efetuada de acordo com o intervalo de tempo definido para o objetivo do trabalho: se for de curta duração, é necessário recorrer a regime transitório, se for de longa duração, pode ser suficiente o regime permanente.

A simulação em regime transitório é iniciada introduzindo um “stress”, como por exemplo uma variação no caudal de extração ou na recarga, ou combinação de “stress” na distribuição das condições iniciais. Se estas condições de stress durarem muito tempo, basicamente o sistema atingirá a condição de regime permanente.

Geralmente utilizam-se os potenciais hidráulicos gerados a partir de modelos em regime permanente como condições iniciais de um modelo em regime transitório.

II.3.5 Calibração

Um modelo numérico, utilizado para simular processos hidrogeológicos, deve ser validado com os dados disponíveis, com o intuito de demonstrar a sua capacidade de previsão, precisão e confiabilidade (Oude Essink, 2001). A maioria dos modelos hidrogeológicos requer ajustes nos parâmetros do sistema, de forma a se aproximar os resultados obtidos pelo modelo, aos dados observados no campo. Este procedimento designa-se de calibração, sendo uma das etapas mais importantes na modelação.

É mais fácil realizar a calibração de um sistema em regime permanente do que em regime transitório, pois não tem em consideração um dos parâmetros desconhecidos, o coeficiente de armazenamento. A precisão do modelo e, conseqüentemente, de todo o estudo dependerá do nível de calibração alcançado.

Existem dois métodos de calibração: tentativa e erro e calibração automática.

A calibração por tentativa e erro foi a primeira a ser utilizada, sendo fortemente influenciada pela experiência do utilizador (Kresic, 2006). Alterando os valores dos parâmetros e analisando os respectivos efeitos, o utilizador desenvolve um sentido crítico para com o modelo.

Durante a calibração automática, as condições de fronteira e os valores dos parâmetros são ajustados até os potenciais hidráulicos calculados apresentarem uma diferença entre valor calculado e observado inferior ao máximo estipulado.

A primeira etapa da calibração termina normalmente quando ocorre uma boa correspondência visual entre os potenciais hidráulicos calculados e observados.

A próxima etapa envolve a quantificação do erro do modelo, através de diversos parâmetros estatísticos, como desvio padrão e distribuição dos resíduos do modelo, isto é, diferenças entre valores calculados e os medidos em campo (Kresic, 2006).

Durante a calibração, o utilizador deve focar-se nos parâmetros menos conhecidos, e alterar apenas ligeiramente os parâmetros dos quais tem melhor conhecimento. Por exemplo, a condutividade hidráulica determinada por vários ensaios de bombagem deve ser o último parâmetro a ser alterado, pois normalmente é o mais sensível.

III. Caraterização do caso de estudo teórico

Com o intuito de analisar o impacte hidrogeológico decorrente da construção de um edifício com cave numa zona aluvionar, definiu-se uma área de estudo teórica limitada a sul por um rio, com nível de água variável entre as cotas 0,5 e 0,4 m, e a norte, a cerca de 790 m do rio, pelo contacto entre aluvião e o maciço rochoso (Figura III.1). No centro da área de estudo implantou-se o edifício a construir, com uma área de 190x75 m², tendo-se estabelecido o fundo de escavação à cota -2,8 m e contenção periférica prolongada até ao substrato rochoso. Foram, ainda, definidas 8 sondagens fictícias na envolvente da obra, com caraterísticas semelhantes ao enchimento aluvionar existente em vales fluviais presentes na cidade de Lisboa, por forma a enquadrar a área de estudo do ponto de vista geológico.

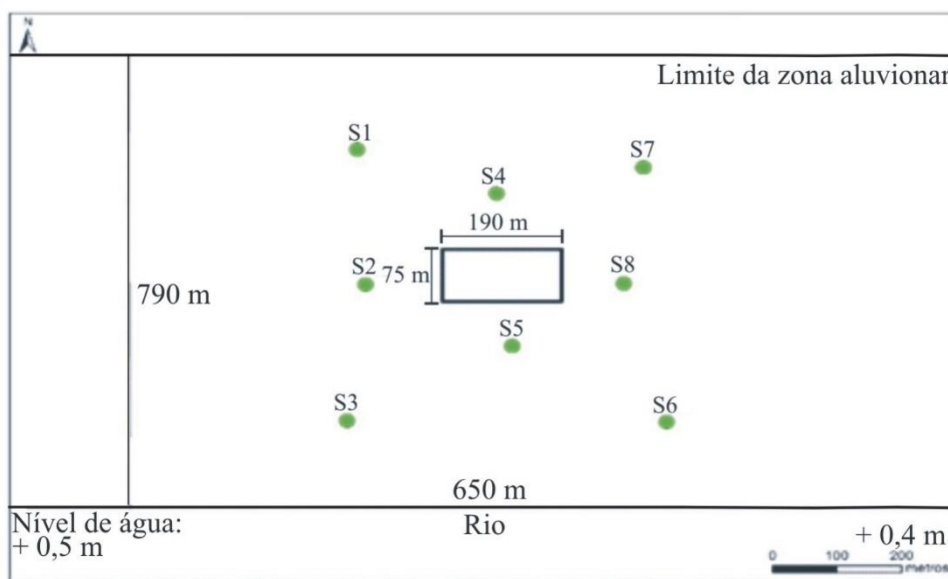


Figura III. 1. Caso de estudo teórico, com a localização das sondagens definidas.

De acordo com as sondagens definidas, cujas sequências litológicas são apresentadas na Tabela III.1, na área de estudo ocorrem depósitos de aterro, assentes sobre depósitos aluvionares, que por sua vez cobrem um substrato rochoso de natureza carbonatada (Figura III.2).

Tabela III. 1. Sequência litológica definida para cada sondagem

Sondagens	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Litologia	Profundidade (m)							
Aterro	0 - 1,5	0 - 3,8	0 - 3,0	0 - 1,5	0 - 2,5	0 - 2,3	0 - 2,6	0 - 1,5
Lodo e Areia Lodosa	1,5 - 5,5	3,8 - 6,4	3,0 - 5,0	1,5 - 5,5	2,5 - 6,0	2,3 - 5,0	2,6 - 3,8	1,5 - 6,0
Areia sem finos	-	6,4 - 9,4	5,0 - 12,0	5,5 - 6,2	6,0 - 10,5	5,0 - 15,0	3,8 - 8,8	6,0 - 12,0
Cascalheira de base	-	9,4 - 13	12,0 - 14,0	-	10,5 - 12,8	15,0 - 16,5	8,8 - 9,5	-
Substrato carbonatado	5,5 - 14,0	13,0 - 19,5	14,0 - 21,5	6,2 - 13,5	12,8 - 18,0	16,5 - 31,5	9,5 - 15,0	12,0 - 16,5

Os depósitos de aterro apresentam uma espessura variável entre 1,5 e 3,8 m. Para a aluvião considerou-se uma camada contínua de lodo/areia lodosa assente sobre uma espessa camada de areia sem finos (espessura total variável entre 4 e 12,7 m), exceto no local da sondagem S1 onde o nível de lodo contacta diretamente com o substrato rochoso. Na base da aluvião, definiu-se nas sondagens S2, S3, S5 e S6 uma cascalheira de base, com uma espessura variável entre 0,7 e 3,6 m. O topo do substrato rochoso, de natureza carbonatada, foi definido entre as profundidades 5,5 m (na sondagem S1) e 16,5 m (na sondagem S6).

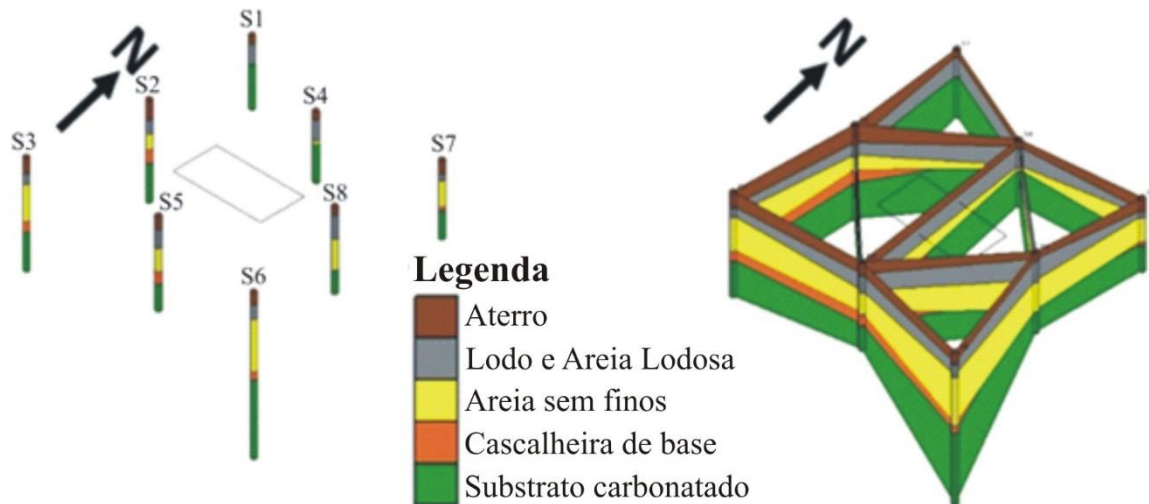


Figura III. 2. Sequência litológica definida para o caso de estudo teórico.

Por forma a representar o mais aproximado possível um caso de estudo real, definiram-se os valores de condutividade hidráulica exibidos na Tabela III.2, para representar resultados de ensaios *in situ* de absorção de água realizados nas sondagens fictícias. De acordo com a Tabela III.2, verifica-se que para a camada de lodo e areia lodosa foram definidas condutividades hidráulicas da ordem de 10^{-7} m/s, para a camada de areia sem finos da ordem de 10^{-4} m/s e para o substrato rochoso da ordem de 10^{-6} m/s.

No que se refere a níveis de água, foram definidos piezómetros para todos os locais de sondagem, tendo-se considerado em 4 locais de sondagem (S1, S4, S6 e S8) a existência de piezómetros duplos, com câmaras de tomada de pressão instaladas na aluvião e no substrato rochoso. Nos restantes locais de sondagem foram definidas câmaras de tomada de pressão apenas na aluvião, maioritariamente na camada de areia sem finos, como se pode observar na Tabela III.3.

De acordo com os níveis de água definidos para os piezómetros (Tabela III.3), verifica-se que o nível de água na aluvião varia entre as cotas 0,36 e 1,20 m e no substrato rochoso entre as cotas 0,4 e 1,25 m. A Figura III.3, obtida através do método de interpolação do inverso do quadrado das distâncias, sugere uma diminuição da cota do nível de água na aluvião para sul e para sudeste, na direção do rio e dos locais das sondagens S8 e S6. No substrato rochoso, o nível de água tende a diminuir para sul, na direção do rio, indicando uma conexão hidráulica entre o substrato rochoso e os depósitos aluvionares.

Tabela III. 2. Características dos ensaios de absorção de água definidos para o caso de estudo teórico.

Ref. da sondagem	Cota do terreno (m)	Prof. do topo do troço de ensaio (m)	Prof. da base do troço de ensaio (m)	Comprimento do troço ensaiado (m)	Litologia	Condutividade hidráulica - K (m/s)
S1	3,29	5	5,5	0,5	Areia Lodosa	$2,4 \times 10^{-7}$
		7,6	14	6,4	Calcário	$1,0 \times 10^{-6}$
S3	3,87	3	3,5	0,5	Lodo arenoso	$1,1 \times 10^{-7}$
		6	6,5	0,5	Areia fina a média	$1,2 \times 10^{-4}$
		7,5	8	0,5	Areia fina a média	$1,1 \times 10^{-4}$
		17	21,5	4,5	Calcário	$3,1 \times 10^{-6}$
S5	3,8	6	6,5	0,5	Areia fina a média	$2,4 \times 10^{-4}$
S6	3,93	3	3,5	0,5	Areia Lodosa	$6,0 \times 10^{-7}$
		6	6,5	0,5	Areia fina a média	$4,3 \times 10^{-4}$
		24	31,5	7,5	Calcário	$8,9 \times 10^{-6}$
S7	3,36	3	3,5	0,5	Areia Lodosa	$3,1 \times 10^{-7}$
		4,5	5	0,5	Areia fina a média	$4,2 \times 10^{-4}$
		6	6,5	0,5	Areia fina a média	$1,2 \times 10^{-4}$
		10,5	15	4,5	Calcário	$2,0 \times 10^{-6}$
S8	3,92	3	3,5	0,5	Lodo arenoso	$1,2 \times 10^{-7}$
		6	6,5	0,5	Areia fina a média	$2,0 \times 10^{-4}$
		7,5	8	0,5	Areia fina a média	$5,0 \times 10^{-4}$
		12	16,5	4,5	Calcário	$8,0 \times 10^{-6}$

Tabela III. 3. Características dos piezômetros definidos para o caso de estudo teórico.

Piezômetro	Cota do furo (m)	Prof. da câmara tomada de pressão - zona do filtro (m)		Cota da câmara tomada de pressão (m)		Litologia	Prof. do nível de água (m)	Cota do nível de água (m)	
		Topo (m)	Base (m)	Topo (m)	Base (m)				
S1	Pz aluvião	3,29	4	5,7	-0,71	-2,41	Areia lodosa	2,09	1,2
	Pz substrato	3,29	9	14	-5,71	-10,71	Calcário	2,04	1,25
S2	Pz aluvião	3,85	7	9	-3,15	-5,15	Areia fina a grosseira	3,11	0,74
S3	Pz aluvião	3,87	5,5	8,5	-1,63	-4,63	Areia fina a média	3,23	0,65
	Pz substrato	3,87	16,5	21,5	-12,63	-17,63	Calcário	3,35	0,53
S4	Pz aluvião	3,47	4,8	6,1	-1,33	-2,63	Areia fina a média	2,57	0,9
S5	Pz aluvião	3,80	6,5	8	-2,70	-4,20	Areia fina a média	3,11	0,69
S6	Pz aluvião	3,93	5	8	-1,07	-4,07	Areia fina a média	3,57	0,36
	Pz substrato	3,93	26	31,5	-22,07	-27,57	Calcário	3,54	0,4
S7	Pz aluvião	3,36	5	7	-1,64	-3,64	Areia fina a média	2,36	1
	Pz substrato	3,36	11	15	-7,64	-11,64	Calcário	2,31	1,05
S8	Pz aluvião	3,92	5,5	8	-1,58	-4,08	Areia fina a média	3,52	0,4

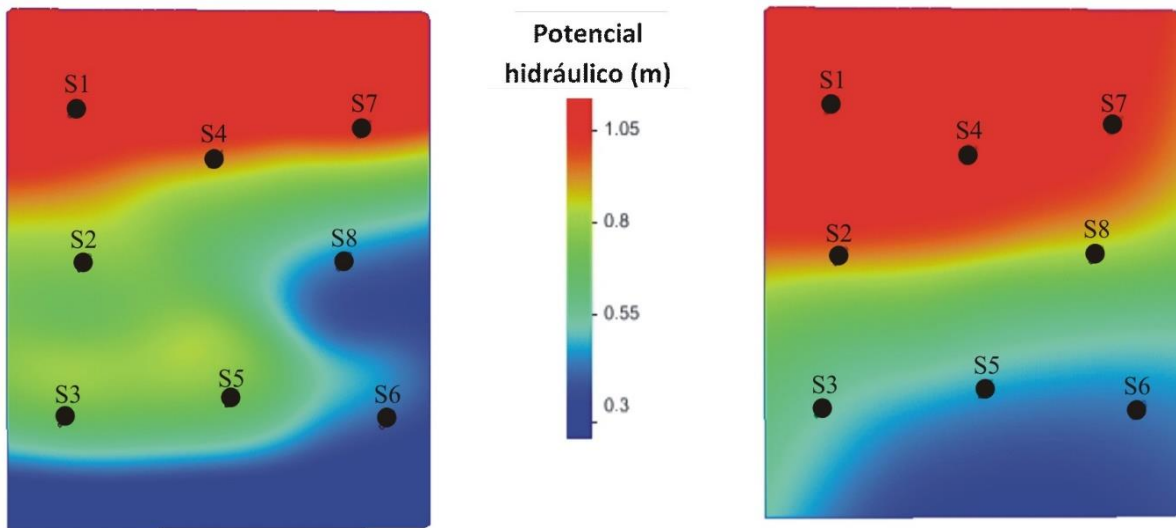


Figura III. 3. Superfície piezométrica obtida para a aluvião (à esquerda) e para o substrato rochoso (à direita), através do método de interpolação inverso do quadrado das distâncias.

IV. Metodologia

Para a concretização dos objetivos, e uma vez que não foi possível analisar um caso de estudo real, definiu-se, previamente, um caso de estudo teórico, por forma a efetuar a análise de impacto hidrogeológico, a análise comparativa de funcionalidades presentes no programa de modelação numérica utilizado, relativas a condições de fronteira, e a análise de sensibilidade aos parâmetros hidráulicos.

O trabalho foi desenvolvido com recurso ao programa *Groundwater Modeling System (GMS*, versão 10.4 da Aquaveo), que contém o algoritmo para resolver o modelo matemático através da interface MODFLOW, desenvolvido por McDonald e Harbaugh (1988), que por sua vez permite simular um modelo de escoamento tridimensional de diferenças finitas, com uma malha de células centradas.

Inicialmente, desenvolveu-se o modelo litológico tridimensional, com base em perfis 2D e mapas de distribuição das unidades interpretadas, produzidos a partir da análise de 8 sondagens fictícias (definidas propositadamente para este efeito). O modelo sólido gerado (Figura IV.1, em cima), apresenta 790 m de comprimento e 650 m de largura, sendo caracterizado por 5 unidades litológicas.

De seguida, criou-se uma malha constituída por células com área de $10 \times 10 \text{ m}^2$, composta por um total de 25 657 células ativas distribuídas por 5 camadas (Figura IV.1, em baixo). Posteriormente, ajustou-se o modelo litológico previamente criado ao modelo numérico produzido através do método *Boundary matching* (Figura IV.2). O algoritmo deste método permite deformar o topo e a base das células que compõem a malha, de forma a se ajustarem o melhor possível, aos limites inferior e superior das unidades geológicas.

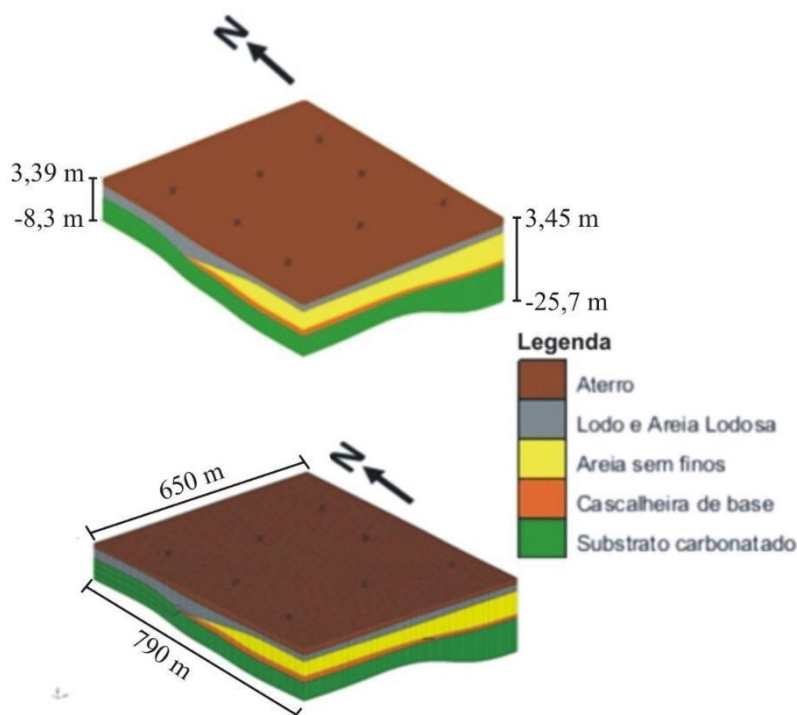


Figura IV. 1. Modelo geológico (em cima) e respetivo modelo numérico (em baixo) para o caso de estudo teórico

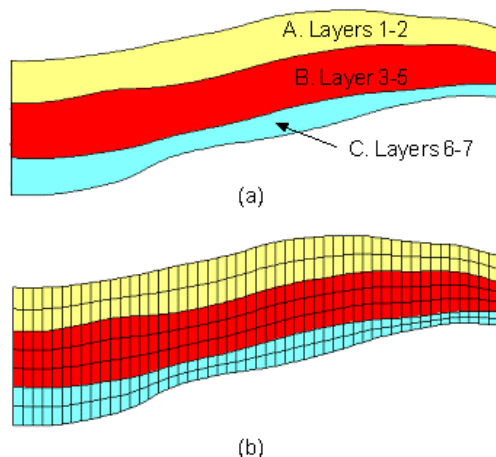


Figura IV. 2. Método Boundary matching. a) Modelo litológico inicial; b) Modelo numérico obtido através do algoritmo.

Uma vez que para a análise de impacto é necessário incorporar o edifício no modelo, procedeu-se, posteriormente, à alteração da base ou topo das células intersetadas pela construção, com o intuito de delimitar o fundo de escavação estabelecido à cota -2,7 m. Como essa cota interseta duas camadas distintas, as camadas 2 e 3 do modelo numérico, caracterizadas por diferentes litologias (lodo e areia sem finos), foi necessário adicionar duas novas camadas ao modelo, para subdividir tanto a camada de lodo como a camada de areia sem finos, e assim, se conseguir definir adequadamente o fundo de escavação. O modelo final apresenta, assim, 7 camadas (Tabela IV.1).

Tabela IV. 1. Correspondência entre as camadas do modelo numérico inicial de 5 camadas e o modelo final de 7 camadas.

Modelo 5 camadas	Modelo 7 camadas
Camada 1	Camada 1
Camada 2	Camadas 2 e 3
Camada 3	Camadas 4 e 5
Camada 4	Camada 6
Camada 5	Camada 7

O modelo numérico final é, portanto, constituído por 7 camadas (Figura IV.3), com características litológicas e hidrogeológicas distintas:

- a camada 1 (a mais superficial), variável entre as cotas 0,2 m e 3,9 m, corresponde aos depósitos de aterro, encontrando-se representada em toda a extensão do modelo;
- a camada 2 (variável entre as cotas -2,7 m e 2,3 m e m) e a camada 3 (variável entre as cotas -6,5 m e 0,2 m) são caracterizadas em toda a sua extensão por lodo e areia lodosa;
- a camada 4 (variável entre as cotas -6,8 m e -0,1 m) e a camada 5 (variável entre as cotas -2,2 m e -11,7 m) representam maioritariamente a areia sem finos, ocorrendo no canto noroeste destas camadas, também o substrato rochoso e uma parte do lodo e areia lodosa;
- a camada 6 (variável entre as cotas -13,1 m e -2,5 m) corresponde à cascalheira de base, nos locais onde ocorre e, na restante área, ao substrato rochoso;
- a camada 7 (variável entre as cotas -28,1 m e -5,5 m) é referente, em toda a sua extensão, ao substrato rochoso carbonatado.

Após a criação da geometria do modelo numérico, procedeu-se à introdução dos parâmetros hidráulicos das unidades litológicas definidas, bem como à definição das condições de fronteira e das condições iniciais do modelo. Inicialmente consideraram-se valores de condutividade hidráulica (k) semelhantes aos definidos para as sondagens, tendo-se posteriormente, durante o processo de calibração do modelo de referência, modificado esses valores (por tentativa e erro), por forma a ajustar o potencial hidráulico calculado pelo modelo aos valores observados (definidos para cada sondagem). Durante o processo de calibração do modelo, considerou-se um bom ajuste um erro inferior ou igual a 0,25 m. Como condições iniciais, estabeleceu-se um potencial hidráulico de 2,5 m, por forma a saturar todas as células. Quanto às condições de fronteira, definiu-se uma fronteira de potencial constante no limite norte do modelo, com valores variáveis entre 1,8 e 2,3 m, e no limite sul, variável entre 0,4 e 0,5 m por forma a representar o nível do rio na área de estudo (Figura IV.4). Salienta-se que não foi considerada recarga no modelo, uma vez que se admitiu tratar de uma zona urbana, onde a recarga é reduzida devido à impermeabilização do terreno.

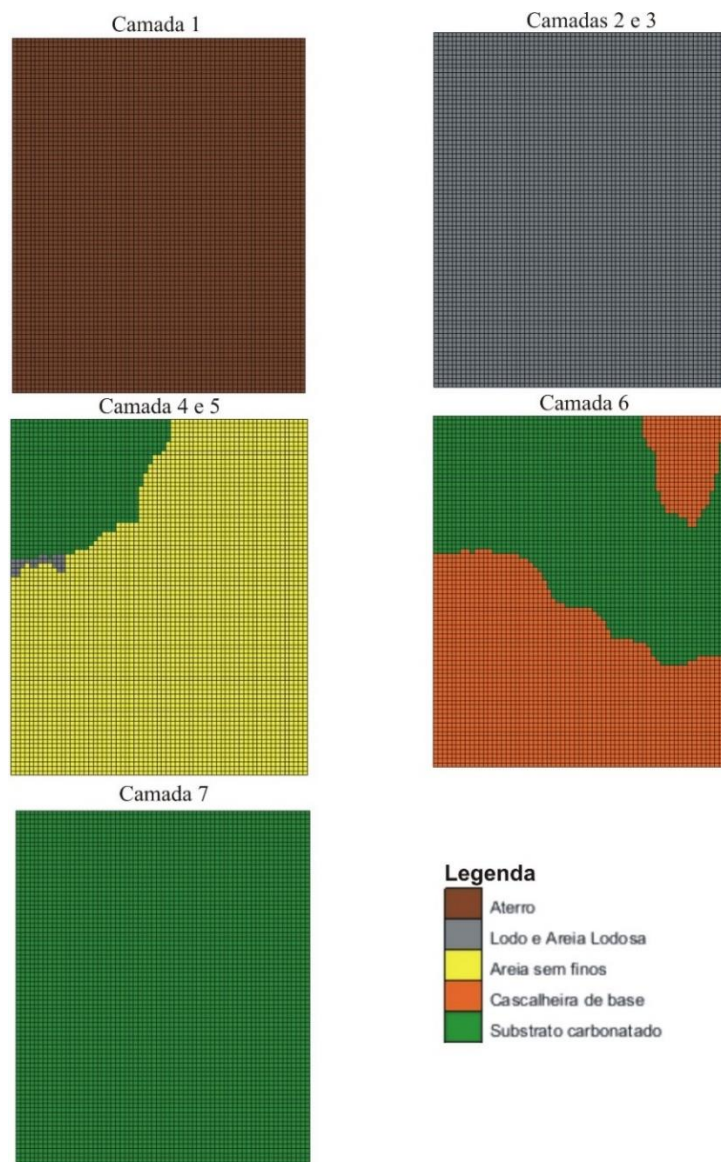


Figura IV. 3. Litologia de cada camada do modelo numérico

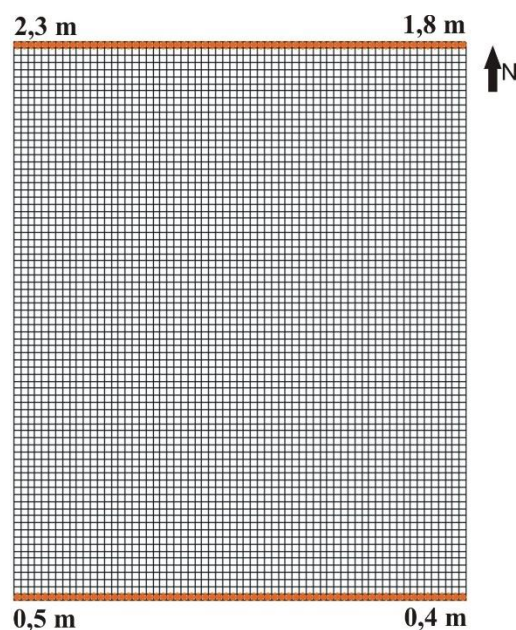


Figura IV. 4. Condições de fronteira introduzidas no modelo da fase de referência.

Após a construção do modelo da fase de referência, e por forma a analisar o impacto hidrogeológico causado pela presença da estrutura impermeável (cave), procedeu-se à simulação do escoamento subterrâneo após a construção do edifício (modelo de previsão). Para isso, colocaram-se como inativas todas as células interseccionadas pela construção da cave. Nas condições iniciais introduziu-se o resultado obtido no modelo de referência após a calibração e incorporou-se a contenção periférica até ao substrato rochoso com recurso à função *Horizontal flow barrier* ($k=0$ m/s).

Na Figura IV.5 apresenta-se o resumo da metodologia descrita anteriormente para a análise do impacto hidrogeológico.

Para a análise do impacto hidrogeológico, comparou-se (subtraiu-se) o resultado obtido no modelo que representa a fase após a construção do edifício ao resultado do modelo da fase de referência (antes da construção).

Posteriormente, com o intuito de efetuar uma análise comparativa das funcionalidades do programa utilizado e de determinar o caudal de extração necessário para efetuar a escavação e a construção da cave em condições de segurança (a seco), o rebaixamento máximo na área envolvente da obra e a cota dos níveis de água no interior da obra, procedeu-se à criação do modelo representativo da fase final de escavação. Para esse efeito, foram simuladas três condições para representar a extração de água no fundo de escavação, designadamente: condição de potencial constante, condição de dreno e condição de poço/furo.

Uma vez que na fase final de escavação a contenção periférica já estará construída, incorporaram-se no modelo barreiras verticais à progressão do fluxo (com recurso à função *Horizontal flow barrier* considerando $K=0$ m/s) em todo o perímetro do edifício até ao substrato rochoso, por forma a simular a estrutura impermeável. Como condições iniciais, considerou-se o resultado obtido no modelo da fase de referência calibrado, tendo-se fixado os valores em todos os limites do modelo por forma a constituírem fronteiras de potencial hidráulico constante, como se pode observar na Figura IV.6.

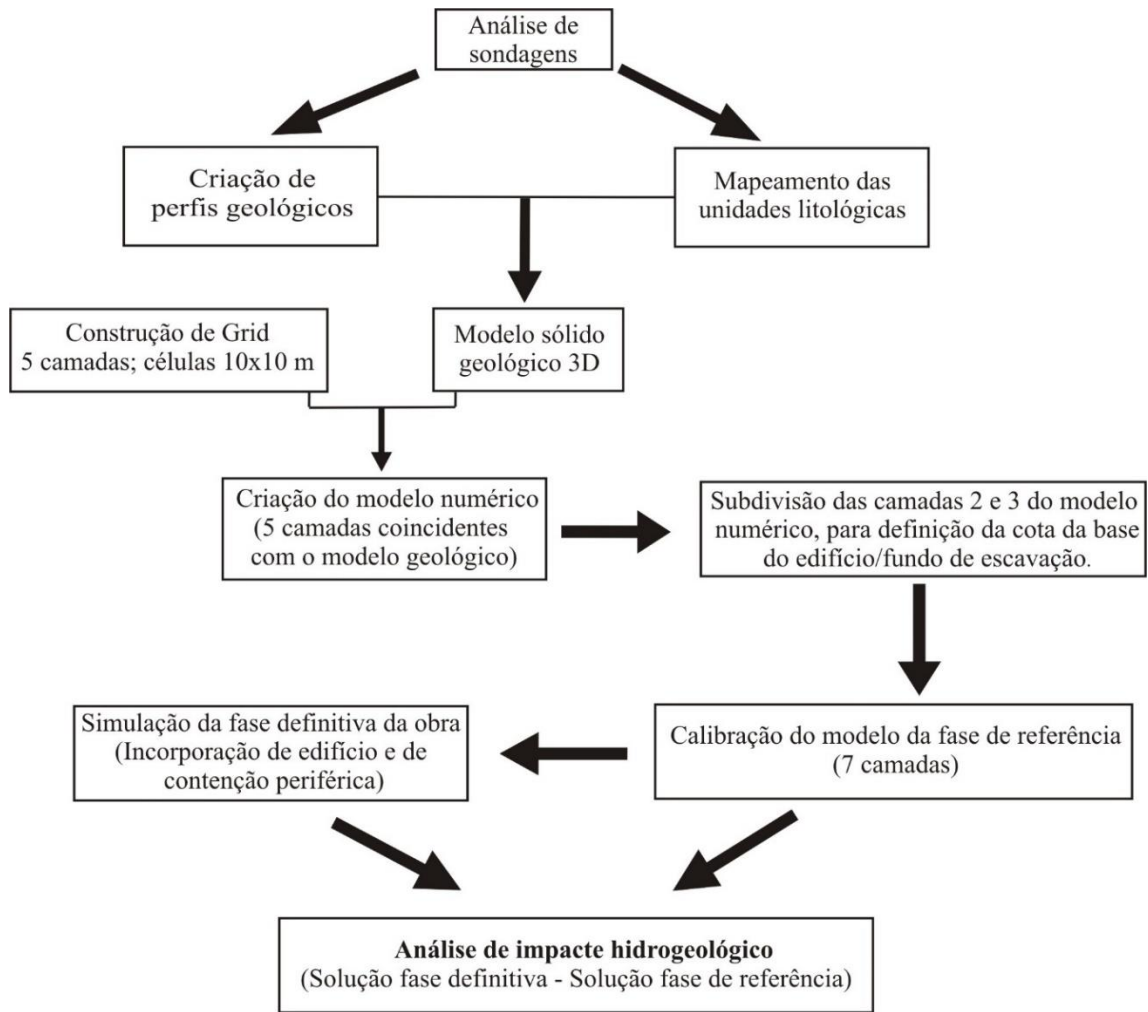


Figura IV. 5. Metodologia aplicada na a análise de impacto hidrogeológico.

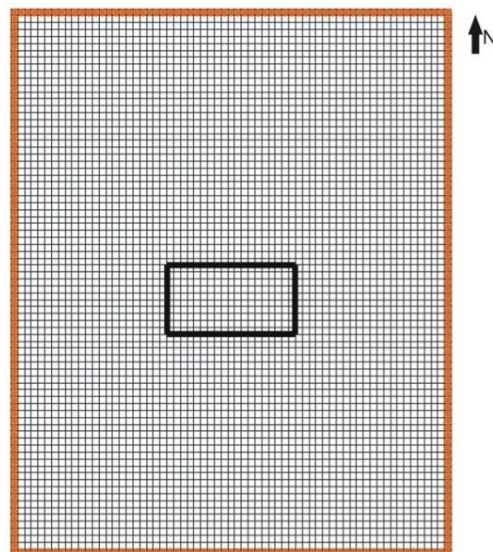


Figura IV. 6. Condições de fronteira de potencial hidráulico constante introduzidas no modelo da fase de escavação.

Na simulação da fase de escavação com recurso à condição de potencial hidráulico constante, foi introduzido um valor de -2,8 m no fundo de escavação, intersetando as camadas 3, 4 e 5 (Figura IV.7). Com o intuito de manter a escavação a seco, a condição de potencial constante foi inserida 10 centímetros abaixo do fundo de escavação previamente definido (Figura V.7).

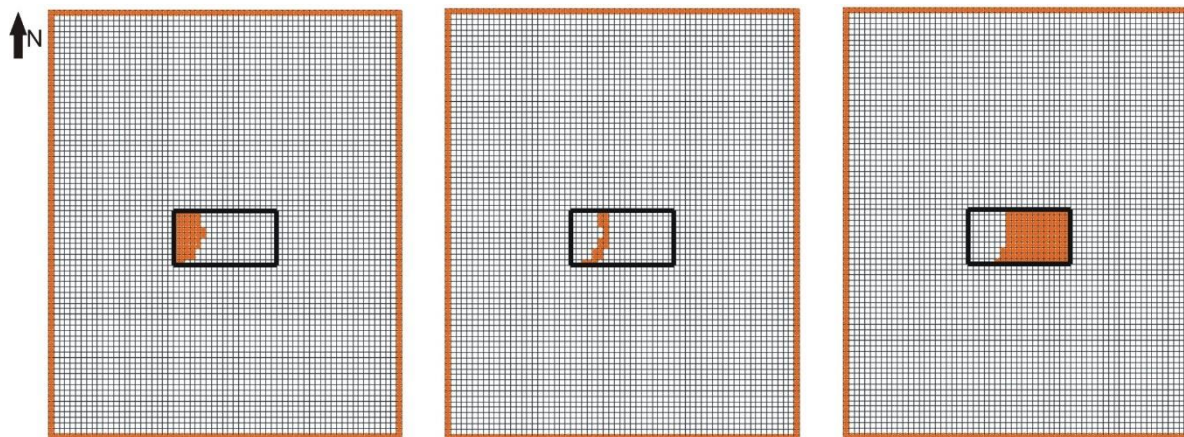


Figura IV. 7. Condição de potencial hidráulico constante no fundo de escavação, nas camadas 3, 4 e 5, respetivamente, para simulação da fase de escavação.

Durante as simulações com a condição de dreno e de poço/furo definida no fundo de escavação, o número de drenos e de furos foi alterado e ajustado, bem como as suas propriedades, por forma a determinar quais as condições mínimas (otimização) necessárias para manter as condições de segurança na obra.

Geralmente, recorre-se à condição de dreno para simular o efeito de drenos num aquífero. Os drenos extraem água do aquífero enquanto o nível freático se mantiver acima da cota da base do dreno. Se o nível rebaixar até uma cota inferior à do dreno, então este deixa de fazer efeito. Existem, assim, dois parâmetros associados à condição de dreno: a cota da base e a condutância do material envolvente.

A taxa de extração de água é proporcional à diferença de cota entre o nível de água e a base do dreno, sendo a constante de proporcionalidade a condutância do material na envolvente do dreno, obtida através da seguinte equação:

$$C = \frac{K}{L} \times A \quad \text{Equação IV. 1}$$

Em que C corresponde à condutância (em m^2/s), K à condutividade hidráulica (em m/s), L à espessura do material envolvente e A à área da secção transversal ao fluxo.

Para a condição de dreno, foi simulada a execução de uma pequena vala para drenagem e extração de água no centro da zona escavação e, de seguida, de duas valas localizadas em cantos opostos da zona da obra (Figura IV.8). A cota de base das valas (drenos) e as respetivas condutâncias foram modificadas, a fim de se obter potenciais hidráulicos no interior da obra inferiores à cota de fundo da escavação.

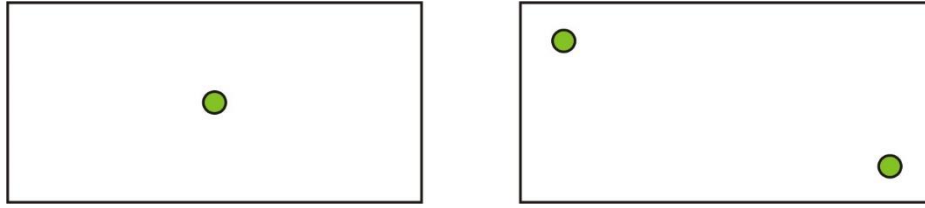


Figura IV. 8. Localização dos drenos nas simulações da fase de escavação: com 1 dreno (à esquerda) e dois drenos (à direita).

Com a condição de poço/furo (*Well*) foi possível investigar o número de poços de extração necessários construir, bem como o caudal necessário extrair para manter o nível de água abaixo da cota de fundo de escavação. A localização e número de poços/furos analisados está apresentado na Figura IV.9.

A Figura IV.10 sintetiza a metodologia aplicada para a simulação da fase de escavação.

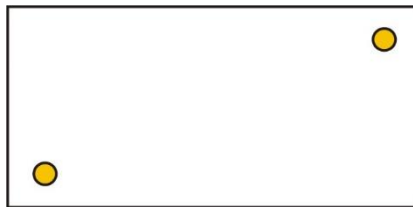


Figura IV. 9. Localização dos poços/furos no interior da obra.

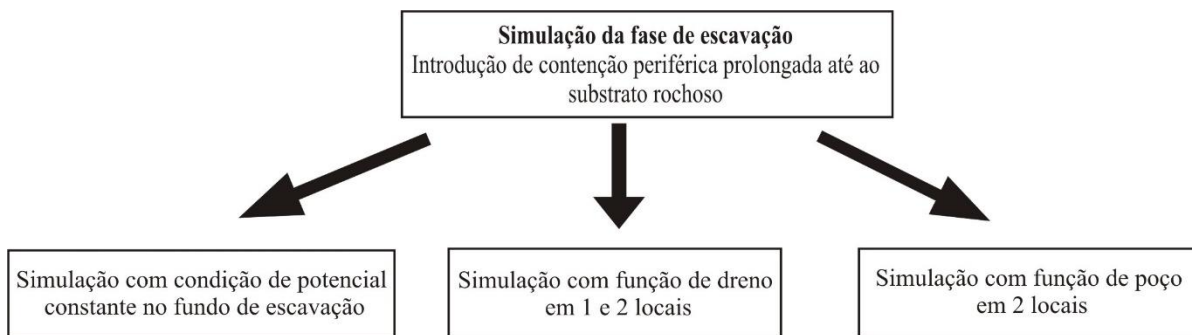


Figura IV. 10. Metodologia aplicada para a simulação da fase de escavação.

Com o intuito de efetuar uma análise de sensibilidade do impacte hidrogeológico relativo aos parâmetros hidráulicos e às condições de fronteira considerados no modelo de referência, procedeu-se às seguintes simulações:

- Diminuição da condutividade hidráulica da areia sem finos, em toda a área do modelo, para um valor uniforme de 3×10^{-5} m/s, ou seja, não considerando zonamento adicional nas camadas 4 e 5 do modelo numérico. As condições de fronteira e as condutividades hidráulicas dos restantes materiais mantiveram-se semelhantes ao adotado no caso de estudo analisado;
- Aumento da condutividade hidráulica areia sem finos, em toda a área do modelo, para um valor uniforme de 5×10^{-3} m/s, ou seja, não considerando zonamento nas camadas 4 e 5 do modelo numérico. As condições de fronteira e as condutividades hidráulicas dos restantes

materiais mantiveram-se semelhantes ao adotado no caso de estudo analisado;

- Diminuição da condutividade hidráulica do substrato rochoso (carbonatado) para um valor constante de 4×10^{-7} m/s. As condições de fronteira e as condutividades hidráulicas dos restantes materiais mantiveram-se semelhantes ao adotado no caso de estudo analisado;
- Aumento da condição de fronteira de montante para um valor constante de 4,4 m, mantendo os valores de condutividade hidráulica obtidos no caso de estudo (considerando zonamento adicional na areia);
- Aumento da condição de fronteira de jusante para valores entre 0,9 e 1 m, mantendo os valores de condutividade hidráulica obtidos no caso de estudo (considerando zonamento adicional na areia);
- Aumento da condição de fronteira de montante para um valor constante de 4,4 m e diminuição da condutividade hidráulica da areia sem finos para um valor uniforme de 3×10^{-5} m/s em toda a área (sem zonamento adicional).

Por forma a determinar os fatores condicionantes do impacte hidrogeológico, comparou-se, para todas as análises de sensibilidade realizadas, o resultado obtido no modelo da fase definitiva com o da fase de referência.

A Figura IV.11 resume a metodologia aplicada para a análise de sensibilidade aos parâmetros hidráulicos e às condições de fronteira consideradas no modelo.

Salienta-se que os valores considerados nas análises de sensibilidade resultaram de várias tentativas realizadas, no sentido de obter a convergência do modelo e, ao mesmo tempo, de obter um erro de balanço hídrico baixo.

De referir, ainda, que todas as simulações efetuadas no âmbito deste trabalho, foram realizadas em regime permanente.

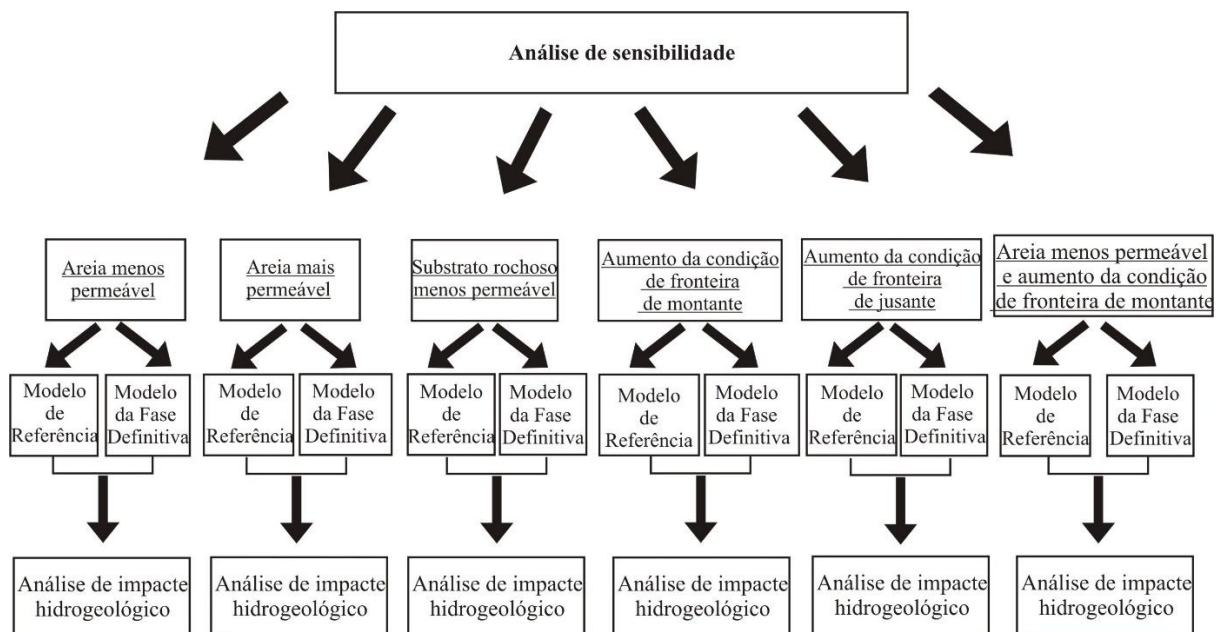


Figura IV. 11. Metodologia aplicada na análise de sensibilidade aos parâmetros hidráulicos e às condições de fronteira.

V. Resultados e Discussão

V.1. Análise do Impacte Hidrogeológico

V.1.1. Simulação da fase de referência (antes da construção)

A modelação numérica da fase de referência, representativa das condições hidrogeológicas existentes previamente à construção do edifício, iniciou-se com a calibração do modelo. Durante este processo, fez-se variar a condutividade hidráulica dos materiais e o potencial hidráulico nos limites do modelo (condições de fronteira), de forma a atingir-se o equilíbrio do sistema de acordo com os níveis de água definidos para os piezómetros considerados para o caso de estudo teórico.

Na Figura V.1 apresentam-se os resultados da calibração realizada inicialmente, em termos de potencial hidráulico e de direção de fluxo. Os valores de condutividade hidráulica obtidos no processo de calibração inicial estão representados na Tabela V.1. Cada piezómetro apresenta uma barra de erro associada, que indica a diferença entre os valores do potencial hidráulico calculados pelo modelo numérico e os valores definidos para os piezómetros, representada com a cor verde, quando as diferenças são inferiores a 0,25m e com a cor laranja quando as diferenças são entre 0,25m e 0,50m.

Com base na análise da Figura V.1, verifica-se que todos os piezómetros se encontram calibrados, exceto os piezómetros nos locais das sondagens S7 e S8, na aluvião e substrato rochoso (barra laranja), ou seja, a diferença entre os valores “observados” e os valores calculados pelo modelo são superiores a 0,25m nesses locais. A Tabela V.2 mostra a diferença entre os valores calculados e os definidos para os diversos piezómetros, onde se pode verificar essa discrepância nos locais das sondagens S7 e S8.

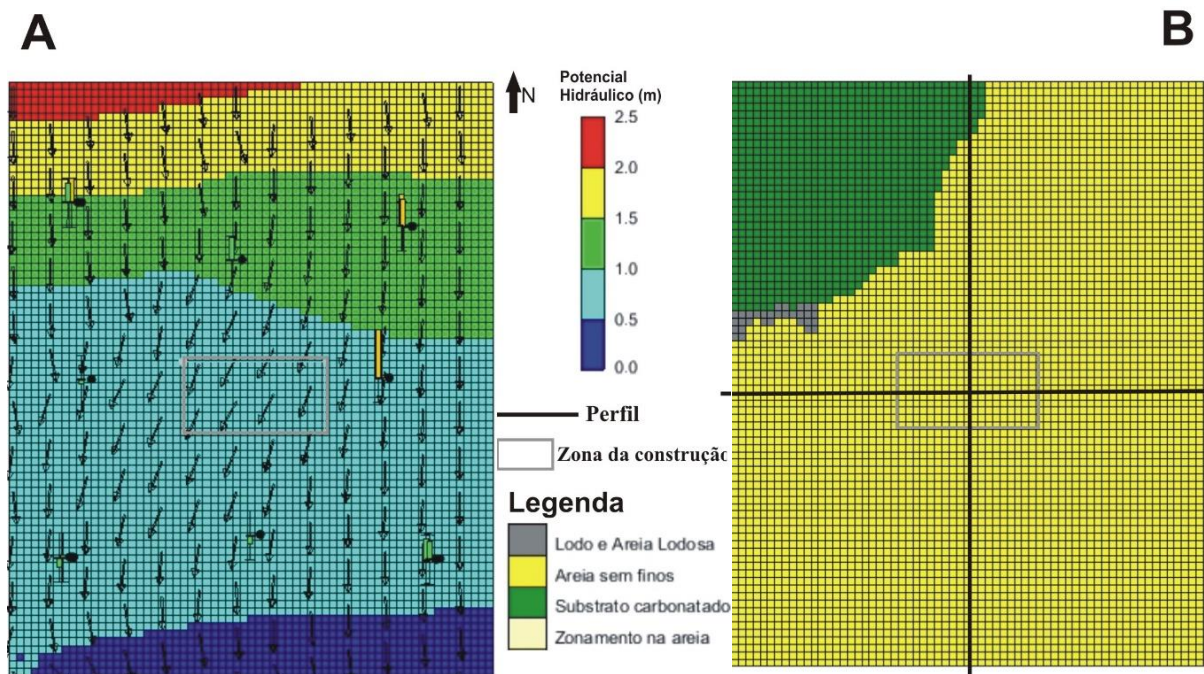


Figura V. 1. Potencial hidráulico e direção de fluxo na camada 5, resultantes da calibração inicial do modelo da fase de referência (A), e litologia da camada correspondente (B).

Tabela V. 1. Condutividades hidráulicas obtidas da calibração inicial do modelo da fase de referência.

Material	K (m/s)
Aterro	2×10^{-5}
Lodo e Areia lodosa	3×10^{-7}
Areia sem finos	1×10^{-4}
Cascalheira de base	9×10^{-7}
Substrato carbonatado	3×10^{-6}

Tabela V. 2. Comparação entre os potenciais hidráulicos “observados” nos piezômetros e calculados pelo modelo, resultantes da calibração inicial do modelo da fase de referência..

Piezômetro	Potencial hidráulico observado (m)	Potencial hidráulico calculado (m)	Diferença (m)
S1_aluv	1,2	1,45	-0,25
S1_subs	1,25	1,46	-0,21
S2_aluv	0,74	0,7	0,04
S3_aluv	0,65	0,55	0,1
S3_subs	0,53	0,55	-0,02
S4_aluv	0,9	1,13	-0,23
S5_aluv	0,69	0,6	0,09
S6_aluv	0,36	0,57	-0,21
S6_subs	0,4	0,58	-0,18
S7_aluv	1	1,33	-0,33
S7_subs	1,05	1,33	-0,28
S8_aluv	0,4	0,89	-0,49

Nos locais das sondagens S7 e S8, o modelo calculou níveis de água mais elevados que os valores “observados” nos piezômetros, indicando que o modelo nessa zona estava a reter muita água. Deste modo, foi necessário adicionar um zonamento na areia sem finos, na região dessas sondagens, com uma condutividade hidráulica mais elevada, por forma a gerar uma direção preferencial de fluxo semelhante à obtida na Figura III.3 e, assim, conseguir-se calibrar o modelo de forma adequada.

O resultado final da calibração (com o zonamento adicional na areia) apresenta-se na Figura V.2 e na Tabela V.3. Da análise da Figura V.2 verifica-se que, com a nova calibração todos os piezômetros apresentam um bom ajuste ao nível de água (barra verde).

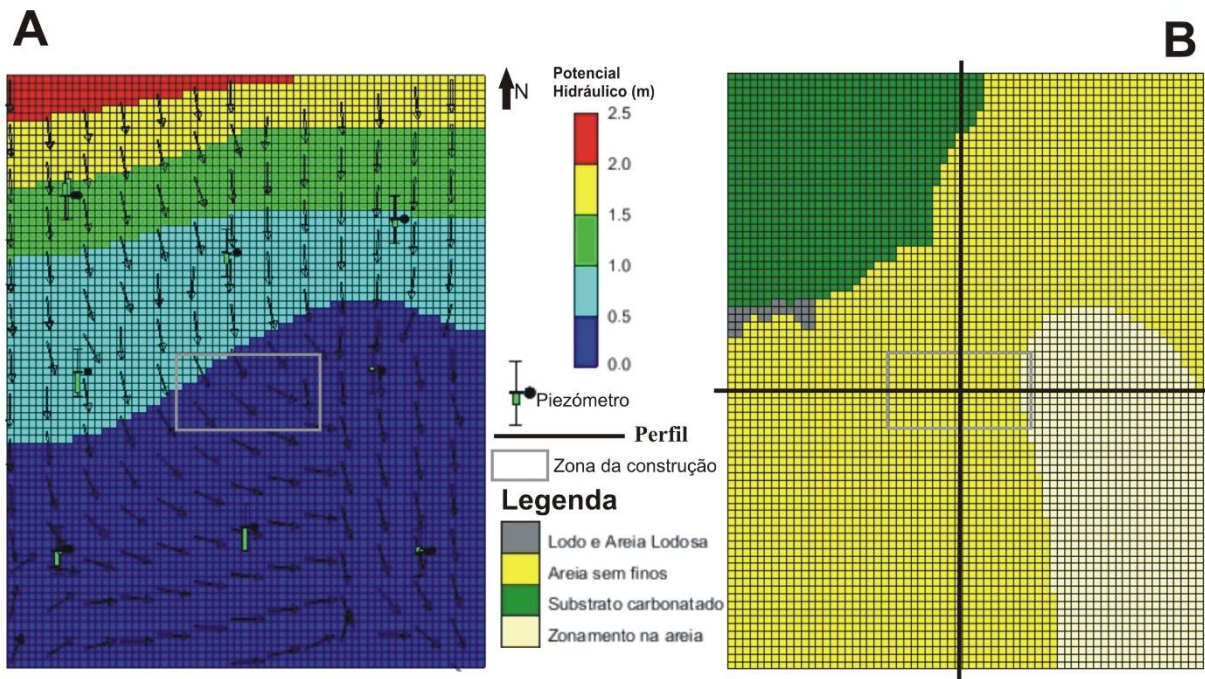


Figura V. 2. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos da camada 5, resultantes da calibração final do modelo da fase de referência (A), e litologia da respectiva camada, com o zonamento adicional na areia (B). Localização dos perfis S-N e E-W indicados com linhas a preto.

Tabela V. 3. Condutividades hidráulicas obtidas na calibração final do modelo da fase de referência.

Material	K (m/s)
Aterro	2×10^{-5}
Lodo e Areia lodosa	3×10^{-7}
Areia sem finos	1×10^{-4}
Cascalheira de base	9×10^{-7}
Substrato carbonatado	3×10^{-6}
Zonamento na areia	5×10^{-3}

A calibração foi considerada satisfatória face à aproximação dos resultados obtidos no modelo à piezometria observada (Tabela V.4). Os erros associados à simulação em regime permanente (erro máximo absoluto, erro médio absoluto e erro quadrático médio) constam na Tabela V.5.

Tabela V. 4. Comparação entre os potenciais hidráulicos observados e os calculados após a calibração final do modelo numérico da fase de referência

Piezómetro	Potencial hidráulico observado (m)	Potencial hidráulico calculado (m)	Diferença (m)
S1_aluv	1,2	1,35	-0,15
S1_subs	1,25	1,36	-0,11
S2_aluv	0,74	0,55	0,19
S3_aluv	0,65	0,49	0,16
S3_subs	0,53	0,49	0,04
S4_aluv	0,90	0,81	0,09
S5_aluv	0,69	0,45	0,24
S6_aluv	0,36	0,42	-0,06
S6_subs	0,4	0,42	-0,02
S7_aluv	1,00	0,98	0,02
S7_subs	1,05	0,98	0,07
S8_aluv	0,4	0,44	-0,04

Tabela V. 5. Erros associados à calibração final do modelo numérico da fase de referência.

Erro máximo absoluto (m)	Erro médio absoluto (m)	Erro quadrático médio (m)
0,24	0,1	0,01

De acordo com as Figuras V.2 a V.4, verifica-se que o escoamento subterrâneo na área de estudo se processa no sentido do rio, ou seja, de N para S, mas também para SE, na direção da zona de permeabilidade mais elevada na areia. Determinou-se um caudal de circulação no modelo de 0,9 L/s, sendo a velocidade máxima do fluxo de $5,6 \times 10^{-8}$ m/s, atingida na região do zonamento adicional na areia (na camada 4 do modelo). Na zona do edifício a construir, o fluxo apresenta uma direção NE-SW e o potencial hidráulico varia entre as cotas 0,44 e 0,53 m. O caudal máximo que atravessa a zona da construção é cerca de 0,06 L/s.

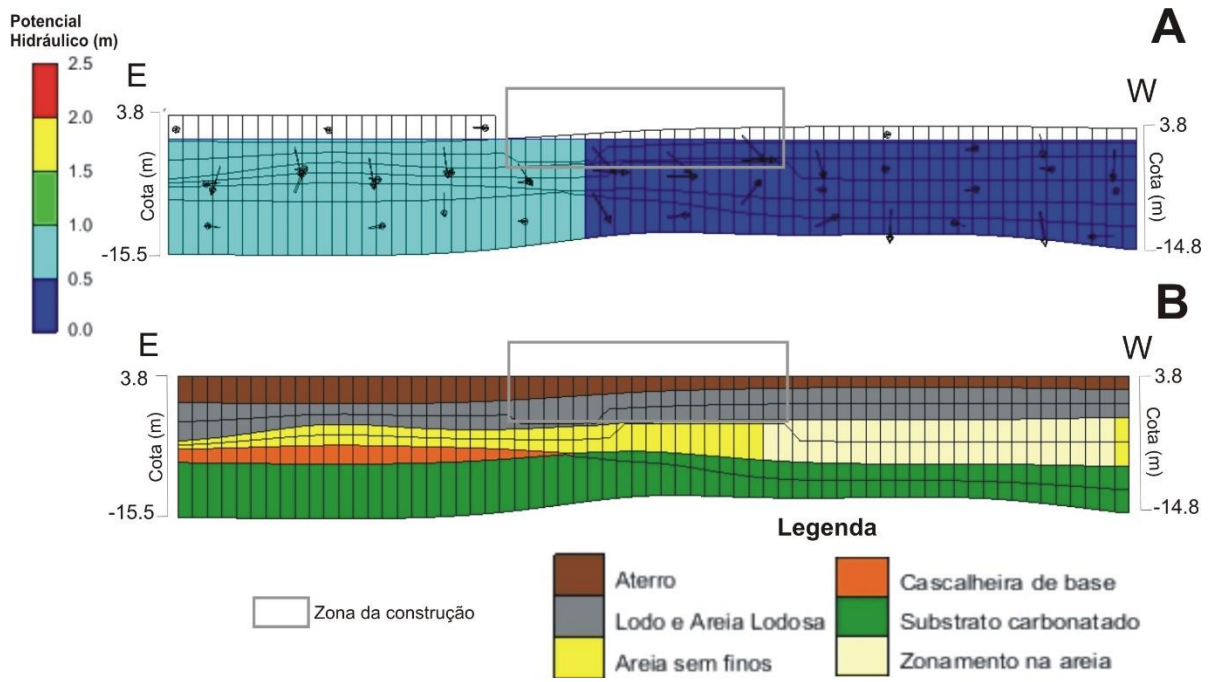


Figura V. 3. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da calibração final do modelo da fase de referência; B) Perfil litológico correspondente.

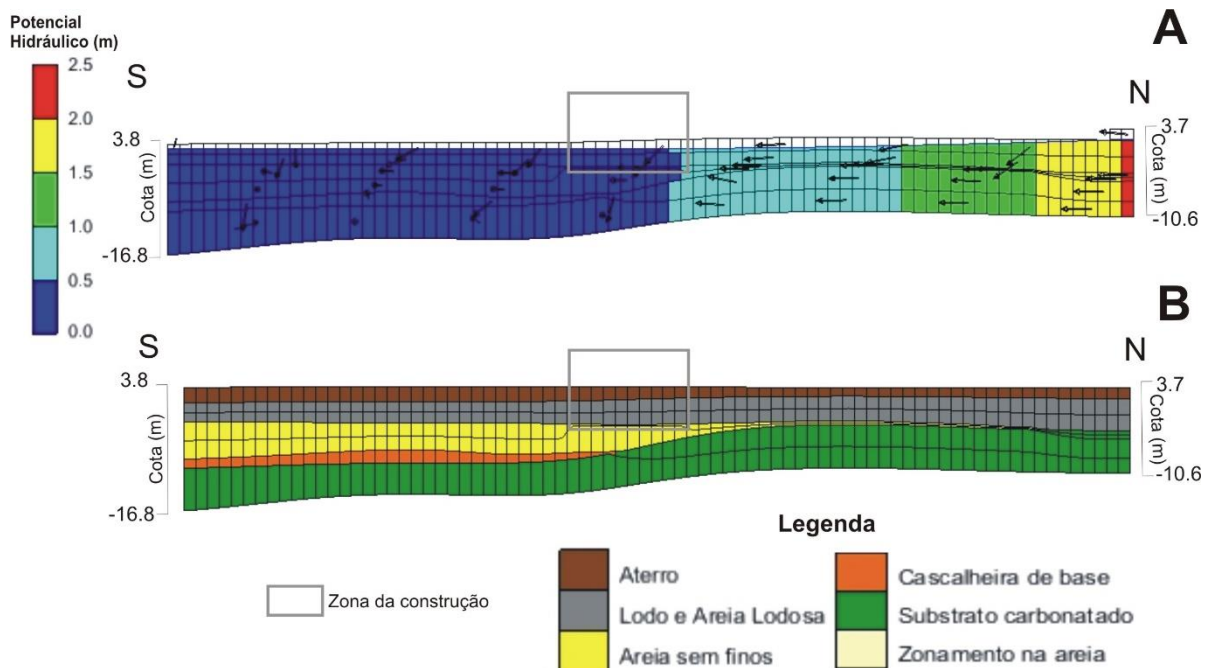


Figura V. 4. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da calibração final do modelo da fase de referência; B) Perfil litológico correspondente.

V.1.2. Simulação da fase definitiva da obra (após a construção do edifício)

Para simular o escoamento subterrâneo após a construção do edifício com cave, adicionou-se ao modelo de referência as estruturas impermeáveis, considerando células inativas na zona do edifício e contenção periférica até ao substrato rochoso simulada com a função *Horizontal flow barrier*.

Os resultados obtidos da modelação representativa desta fase, apresentados nas Figuras V.5, V.6 e V.7, sugerem que, após a construção do edifício, as direções gerais do fluxo, na área de estudo, serão muito semelhantes às descritas para a fase de referência, ou seja, na direção do rio e da zona mais permeável da areia, com velocidades máximas do fluxo semelhantes às obtidas no modelo da fase de referência, ou seja, de $5,6 \times 10^{-8}$ m/s. No entanto, na zona do edifício, o fluxo irá contornar a estrutura subterrânea, como seria expectável.

No que se refere ao potencial hidráulico na envolvente do edifício, prevê-se que este deva variar entre as cotas 0,44 m (a jusante) e 0,58 m (a montante). Na zona de implantação do edifício, o caudal será reduzido para um valor de 0,01 L/s (na base do edifício), ou seja, há uma diminuição de 0,05 L/s relativamente às condições iniciais (fase de referência), devido à presença da estrutura impermeável (efeito de barreira). Após a construção da cave, estima-se que a água subterrânea exerça uma pressão máxima na base do edifício equivalente a uma coluna de água com 3,21 m de altura.

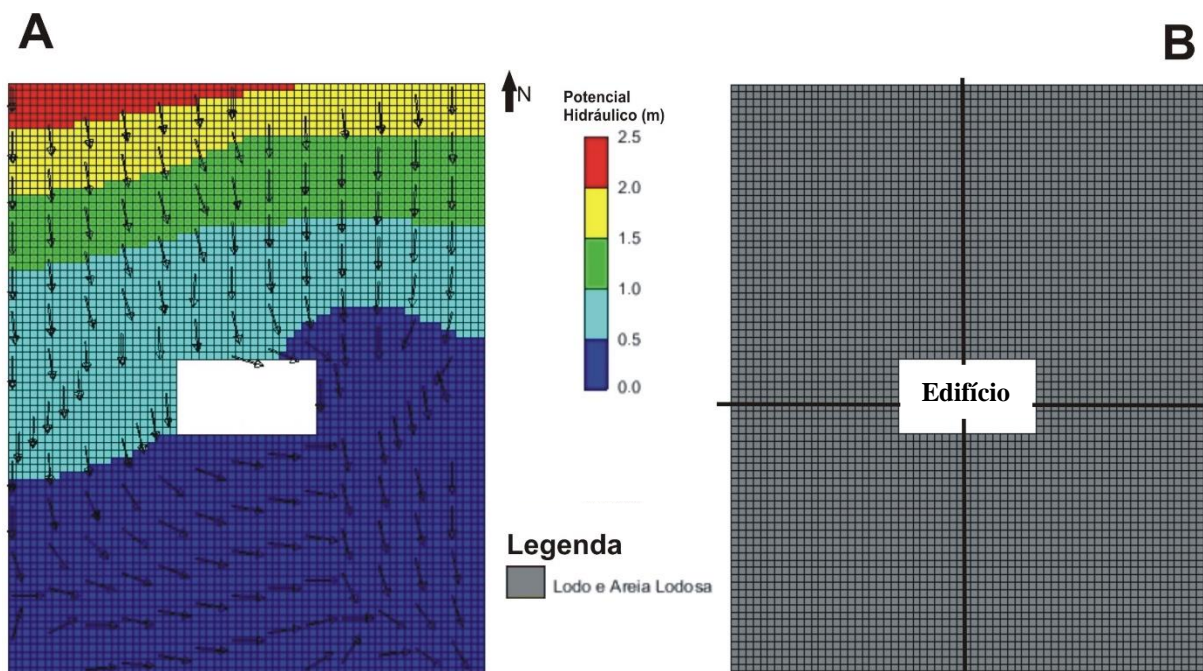


Figura V. 5. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 2, resultantes da simulação numérica da fase definitiva da obra (A) e litologia da respetiva camada (B). Localização dos perfis S-N e E-W indicados com linhas a preto.

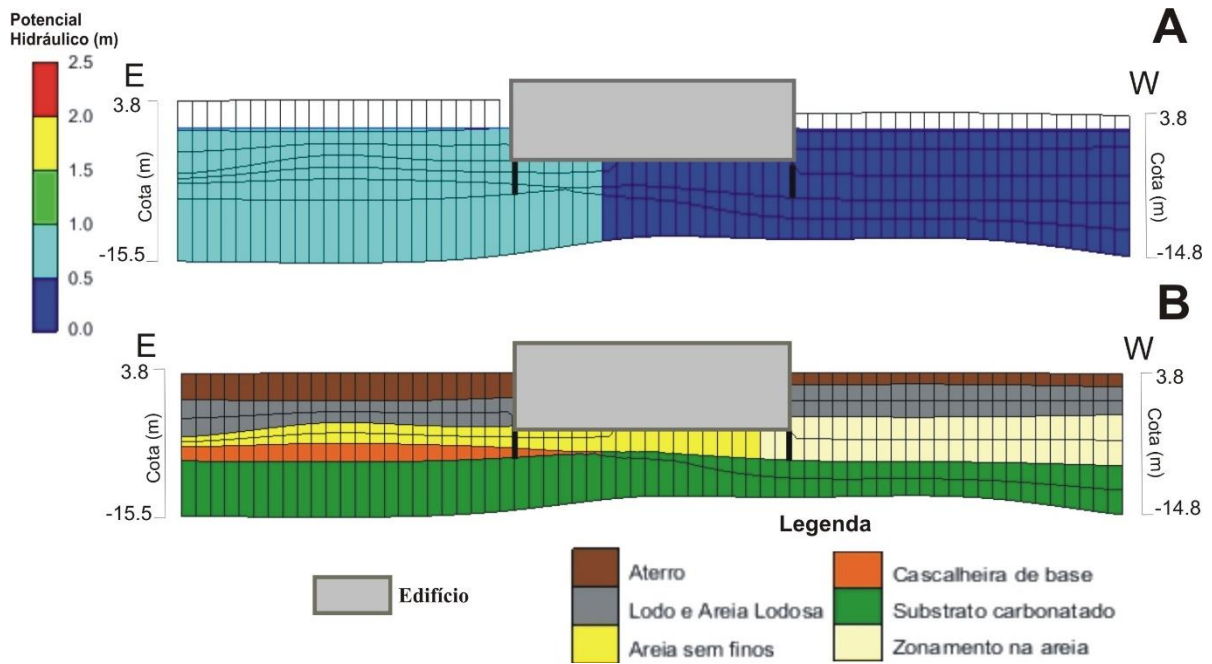


Figura V. 6. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva da obra; B) Perfil litológico correspondente.

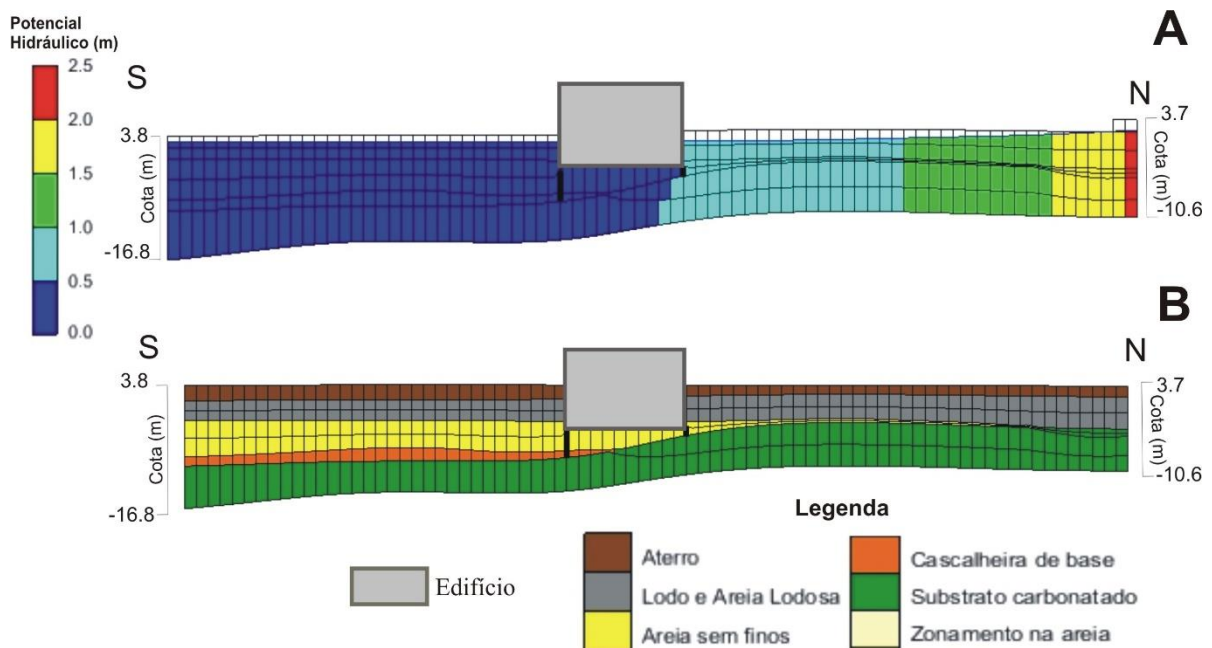


Figura V. 7. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva da obra; B) Perfil litológico correspondente.

Com o objetivo de quantificar o impacto produzido pela construção da estrutura subterrânea, comparou-se o resultado obtido para a fase definitiva da obra com o obtido para a fase de referência, tendo sido determinado o resultado apresentado na Figura V.8.

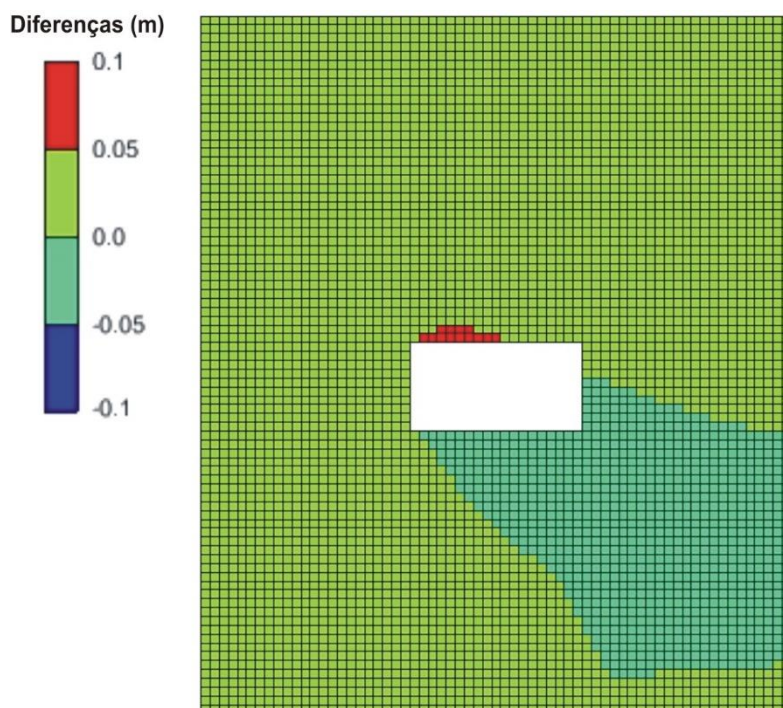


Figura V. 8. Diferença entre o potencial hidráulico obtido para a fase definitiva e o obtido para a fase de referência, na camada 2 do modelo, considerando contenção periférica até ao substrato rochoso.

De acordo com a Figura V.8, constata-se que, após a construção da estrutura impermeável, os níveis de água deverão ser muito semelhantes aos da fase de referência, com variações pouco significativas, ocorrendo subidas máximas de 6 cm, a montante do edifício, e descidas de 1 cm, a jusante do mesmo. Conclui-se, portanto, que o impacte associado à construção do edifício, nas condições geológicas e hidrogeológicas analisadas, será muito reduzido.

O resumo dos resultados da análise de impacte hidrogeológico do caso de estudo teórico é apresentado na Tabela V.6.

Tabela V. 6. Quadro-resumo dos resultados obtidos para o caso de estudo teórico.

Caudal de circulação no modelo (L/s)	Caudal de circulação na zona da construção no modelo de referência (L/s)	Caudal de circulação na zona da obra após a construção (L/s)	Subidas a montante do edifício (m)	Descidas a jusante do edifício (m)
0,9	0,06	0,01	0,06	0,01

V.2. Simulação da fase de escavação da obra

Durante a fase de construção é necessário efetuar a extração de água afluyente ao fundo de escavação, por forma a manter as condições de segurança na obra. Com o intuito de simular esta fase, procedeu-se à criação do modelo representativo da fase final de escavação, a fim de se efetuar uma análise comparativa de diferentes condições para simular a extração de água e de determinar o caudal necessário extrair da zona de escavação para manter a obra a seco.

Assim, realizou-se a simulação da fase de escavação considerando três condições para representar a extração de água no fundo de escavação: condição de potencial constante no fundo de escavação, condição de dreno, e por fim, condição de poço/furo de bombagem.

V.2.1. Simulação com condição de potencial constante no fundo de escavação

Impondo a condição de potencial à cota -2,8 m no fundo de escavação, obteve-se os resultados expressos nas Figuras V.9, V.10 e V.11.

Devido ao rebaixamento do nível de água na zona de escavação, gerado pela extração de água, verifica-se que o fluxo de água se dirige para a zona da obra, uma vez que é onde ocorrem potenciais hidráulicos mais baixos. Considerando esta condição de fronteira, obtém-se um rebaixamento máximo na envolvente da obra de 1,3 m.

Por forma a manter o potencial constante à cota -2,8 m no fundo necessário, e, desta forma, manter as condições de segurança em obra, determinou-se um caudal de extração de 1,5 L/s.

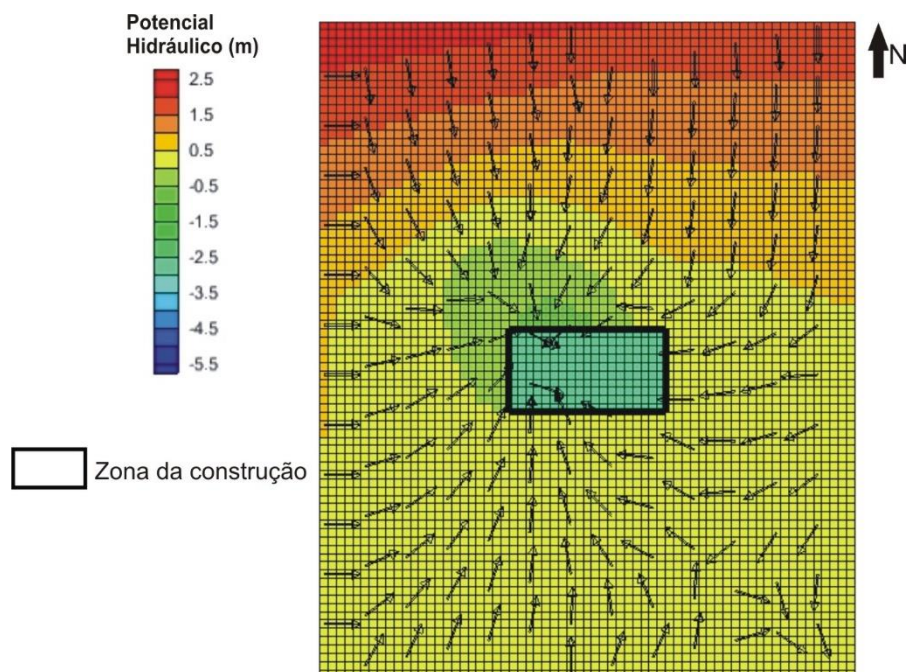


Figura V. 9. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação numérica da fase de escavação, recorrendo à condição de potencial constante no fundo de escavação.

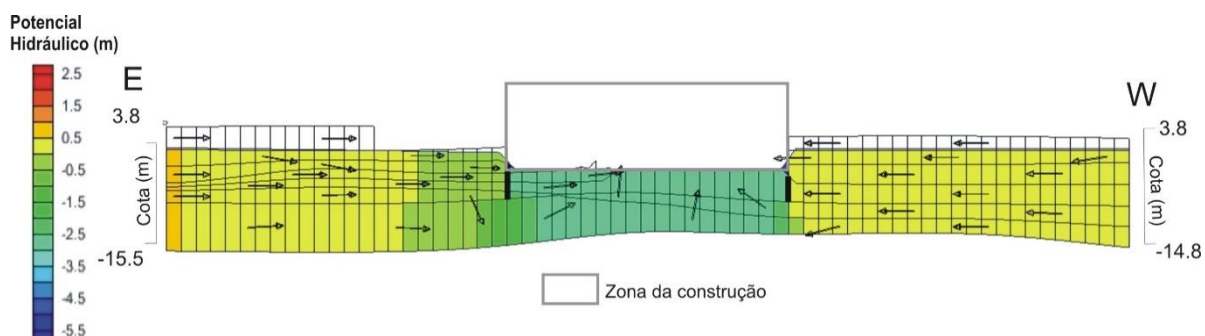


Figura V. 10. Perfil E-W do potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, recorrendo à condição de potencial constante no fundo de escavação.

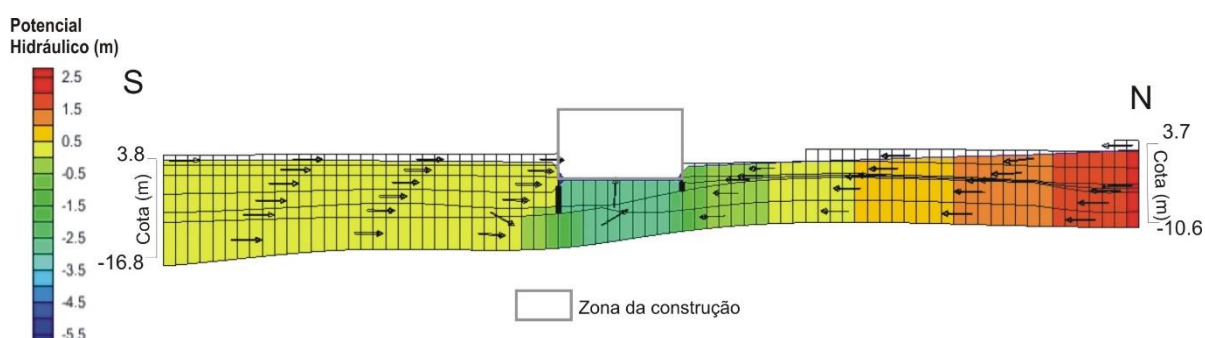


Figura V. 11. Perfil S-N do potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, recorrendo à condição de potencial constante no fundo de escavação.

V.2.2. Simulação com a condição de dreno no fundo de escavação

A condição de dreno (Condição de Cauchy) foi simulada considerando um e dois drenos para drenagem e extração da água. Inicialmente, colocou-se um dreno no centro da zona de escavação para simular uma vala de drenagem/bombagem, variando-se, posteriormente, a condutância (calculada a partir da Equação IV.1) e a cota da base do dreno, por forma a rebaixar o máximo possível o nível de água no interior da escavação. Admitiu-se que a vala poderia ter uma profundidade máxima até 3m e uma área até 3x2 m².

O melhor resultado obtido, por tentativa e erro, apresentado nas Figuras V.12 a V.14, sugere que com uma vala (dreno) com três metros de profundidade abaixo do fundo de escavação (cota de base -5,7 m), uma área de 3x2 m², e, por sua vez, uma condutância de 0,0036 m²/s, é necessário extrair 1,3 L/s para se obterem níveis de água na escavação variáveis entre as cotas -5,3 e -2,1 m. Verifica-se, assim que um dreno, com estas características, não é suficiente para manter a escavação a seco. Na envolvente da obra, foi determinado um rebaixamento máximo de 1,1 m.

Deste modo, de seguida, efetuou-se uma simulação considerando dois drenos em cantos opostos da zona de escavação, funcionando como valas de drenagem/bombagem. Mais uma vez, alteraram-se sucessivamente as condutâncias e a cota da base dos drenos até se obterem níveis de água abaixo do fundo de escavação.

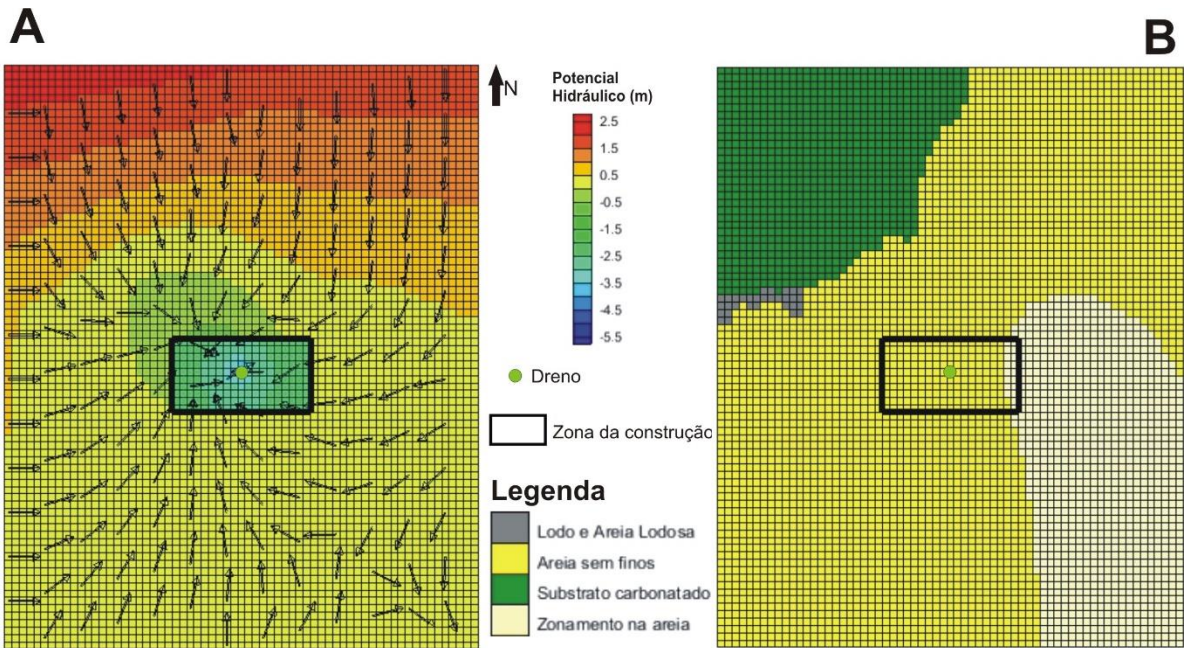


Figura V. 12. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, considerando um dreno (A) e litologia da respectiva camada (B)

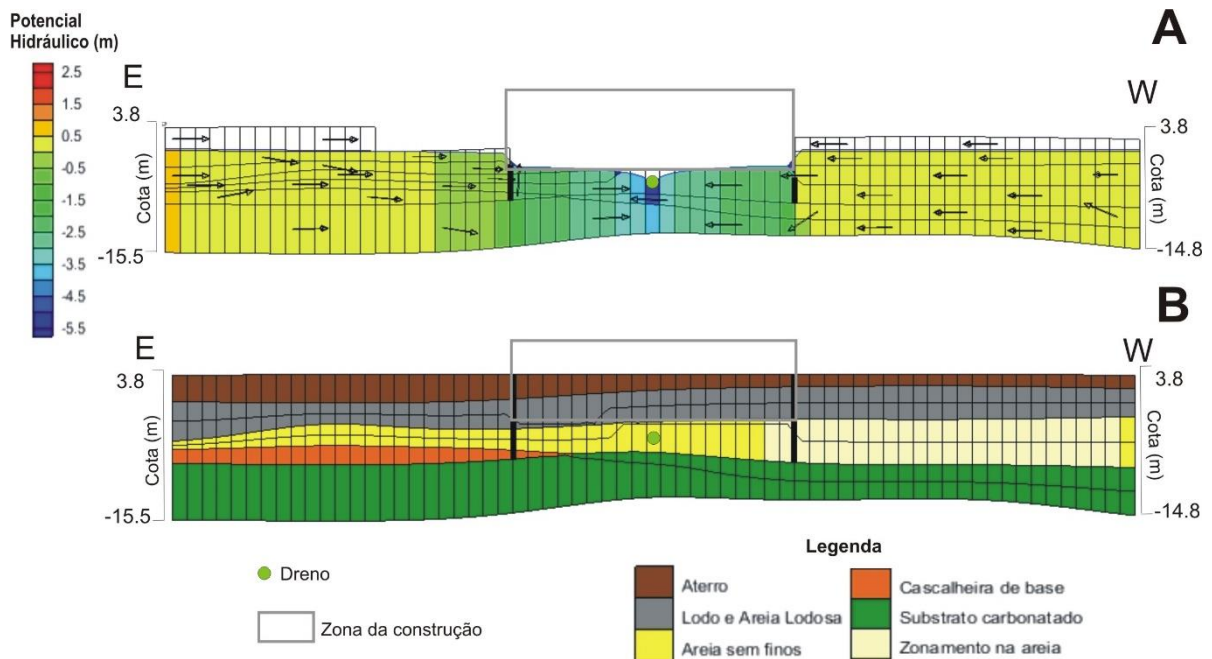


Figura V. 13. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, considerando um dreno; B) Perfil litológico correspondente.

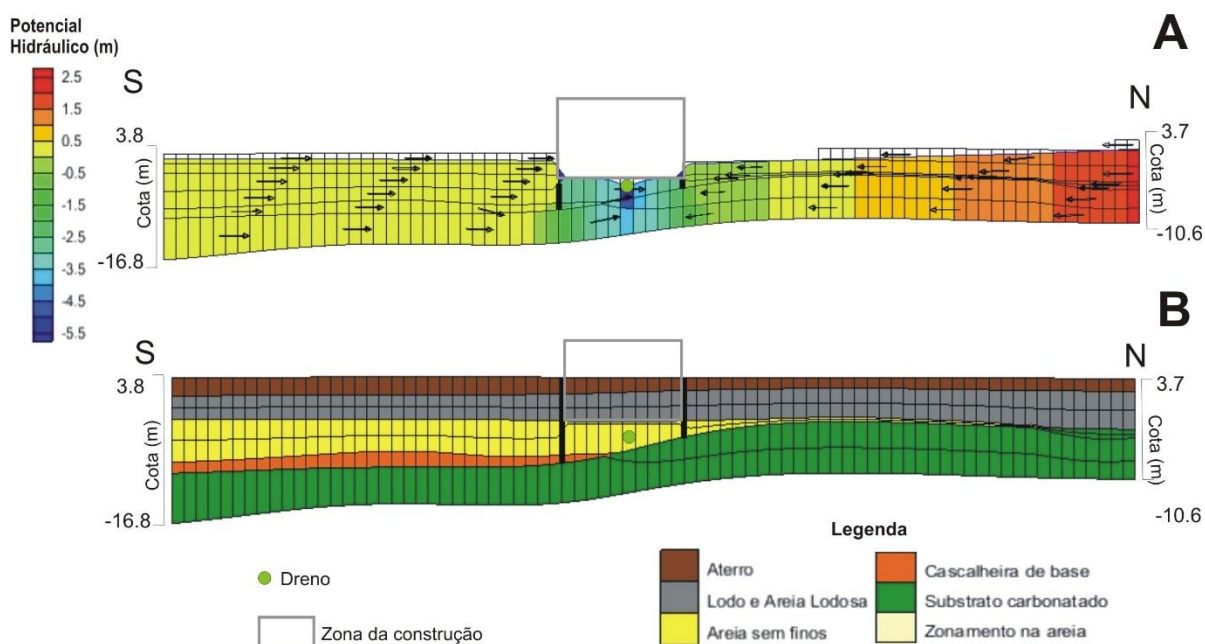


Figura V. 14. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, considerando um dreno; B) Perfil litológico correspondente.

Com base nas análises efetuadas, verifica-se que duas valas com dois metros de profundidade abaixo do fundo de escavação (cota da base -4,8 m), uma área de $2 \times 2 \text{ m}^2$ e, por sua vez, condutâncias de $0,0014 \text{ m}^2/\text{s}$ (D1) e $0,00065 \text{ m}^2/\text{s}$ (D2) são suficientes para manter a escavação a seco.

Os resultados da modelação da fase de escavação recorrendo a dois drenos, com as características descritas anteriormente, estão representados nas Figuras V.15, V.16, V.17, V.18 e V.19. A primeira figura mostra os resultados em planta com a localização dos drenos, as duas figuras seguintes dizem respeito a cortes transversais e longitudinais ao dreno (D1), e as restantes figuras representam cortes transversais e longitudinais ao dreno (D2).

De acordo com as figuras anteriores, o fluxo aflui à escavação, ocorrendo um rebaixamento na zona envolvente de 1,4 m. Na zona de escavação o nível de água encontra-se abaixo da cota -2,7 m (entre as cotas -4,3 e -2,7 m), pelo que é possível realizar a escavação em condições de segurança (a seco).

Para estas condições, os resultados indicam que será necessário extrair um caudal de 0,7 L/s no local do dreno D1 e de 0,9 L/s no local do dreno D2, o que perfaz um total de 1,6 L/s necessários extrair em toda a área de escavação.

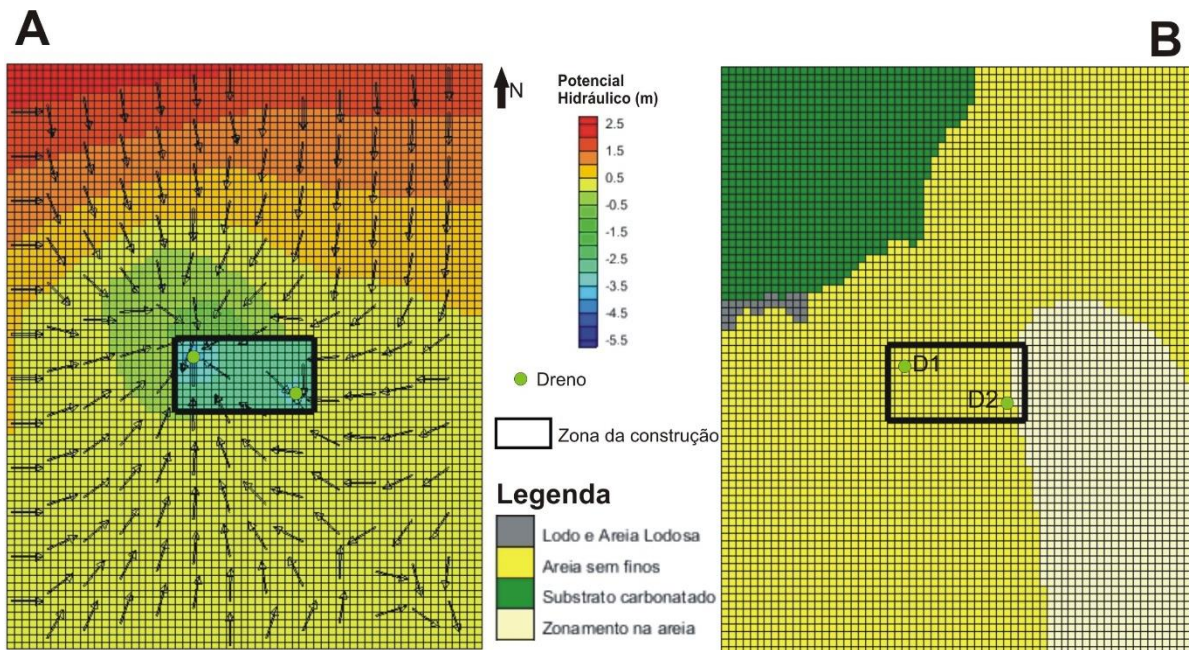


Figura V. 15. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, recorrendo a dois drenos (A) e litologia da respetiva camada (B).

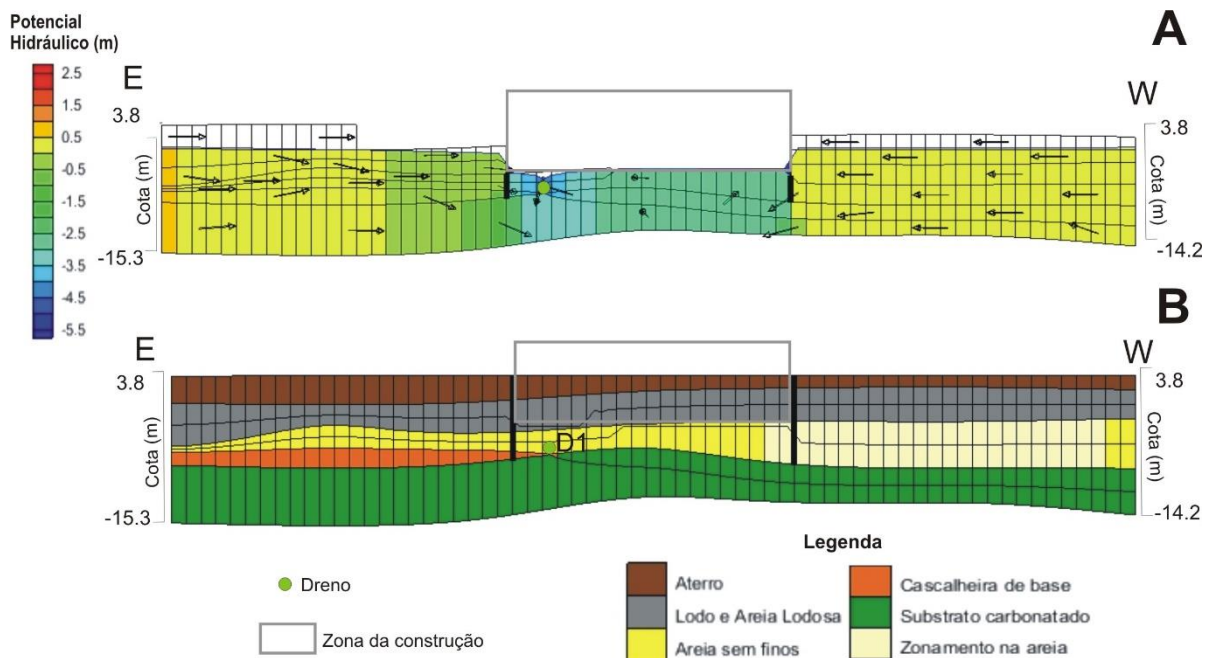


Figura V. 16. Perfil E-W na zona do dreno D1. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, recorrendo a dois drenos; B) Perfil litológico correspondente.

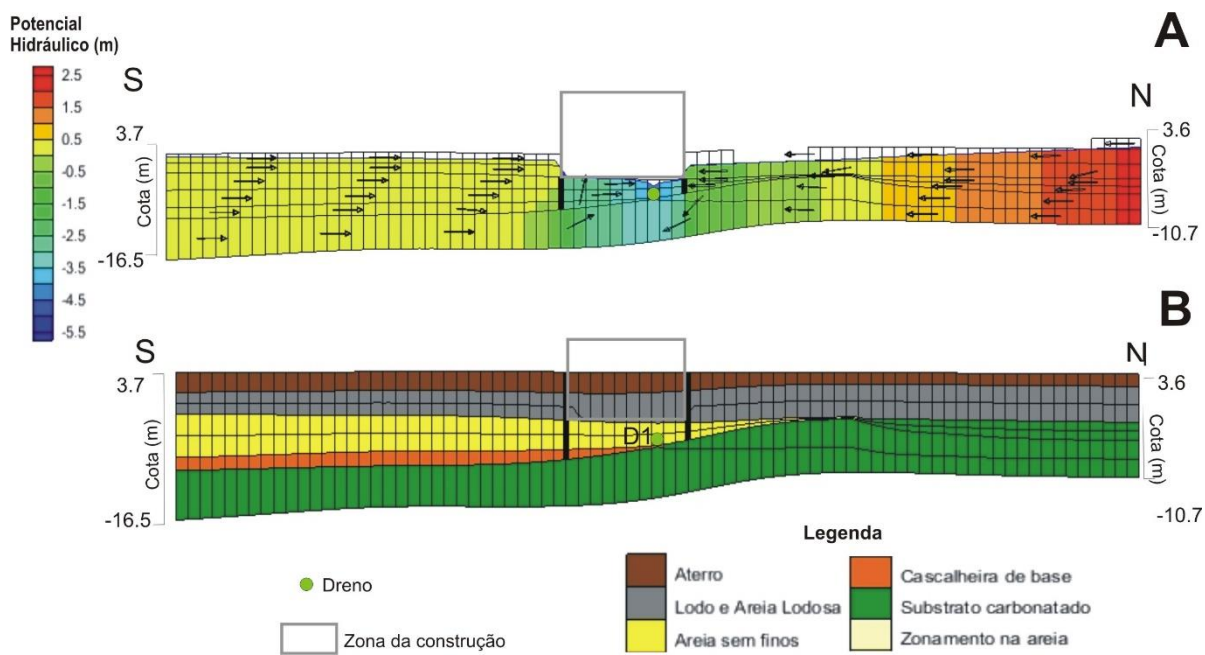


Figura V. 17. Perfil S-N na zona do dreno D1. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, recorrendo a dois drenos; B) Perfil litológico correspondente.

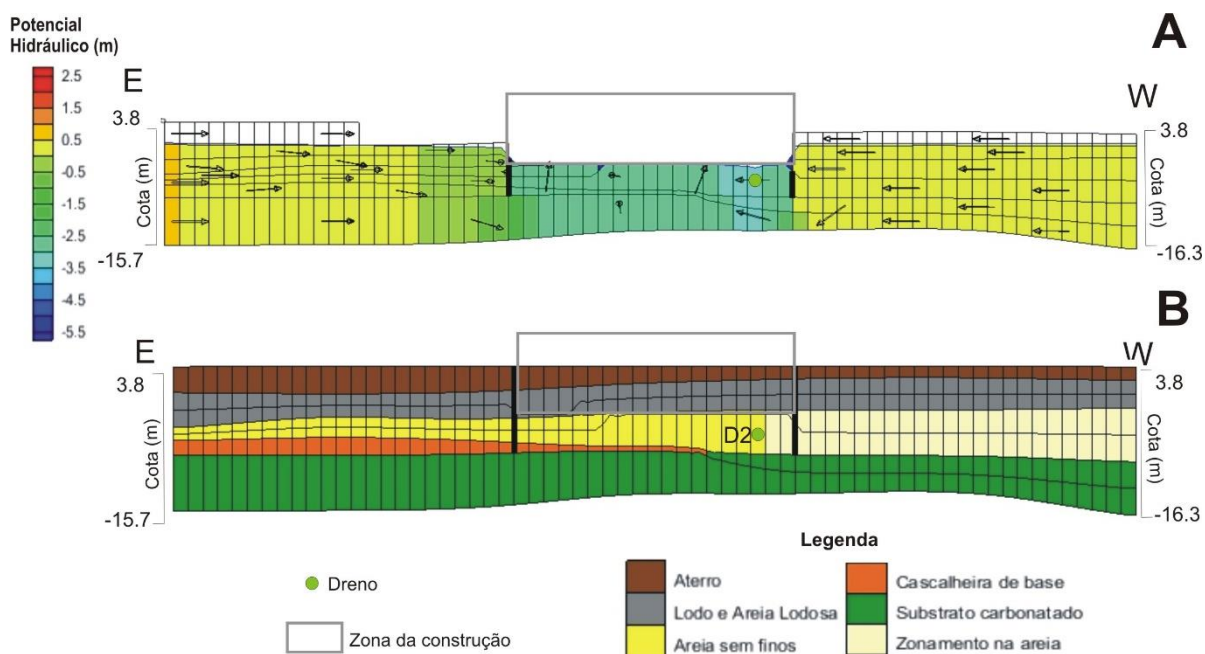


Figura V. 18. Perfil E-W na zona do dreno D2. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, recorrendo a dois drenos; B) Perfil litológico correspondente.

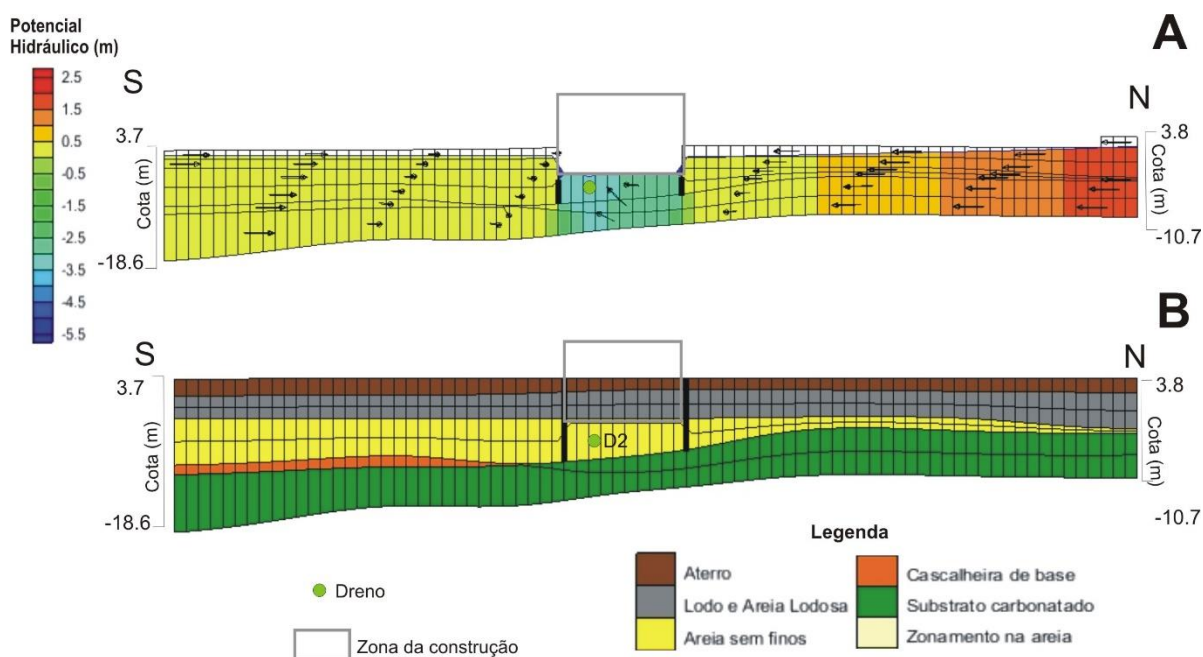


Figura V. 19. Perfil S-N na zona do dreno D2. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, recorrendo a dois drenos; B) Perfil litológico correspondente.

V.2.3. Simulação com a condição de poço/furo de bombagem

Por fim, recorreu-se à condição de poço de bombagem (*Well*) para simular a fase de escavação, tendo sido colocados dois poços em cantos opostos da zona de escavação, tal como na situação anterior, pois já se previa que um poço não seria suficiente, devido à experiência realizada com apenas um dreno.

Assim, variou-se o caudal nos dois poços/furos de bombagem, por forma a se obter níveis de água no interior da obra inferiores à cota do fundo de escavação. Para além do caudal, variou-se, igualmente, a profundidade e extensão da câmara de tomada de pressão de água.

O resultado obtido, por tentativa e erro, apresentado nas Figuras V.20 a V.24, sugere que para manter a escavação a seco é necessário executar dois poços de bombagem com câmaras de tomada de pressão instaladas entre as cotas -6 m e -4 m, com caudais de extração de 0,6 L/s (W1) e 1,1 L/s (W2) respetivamente, totalizando uma extração de 1,7 L/s na área da escavação. A análise das figuras anteriormente referidas, sugere que para estas condições os níveis de água variam entre as cotas -4,4 m e -2,8 m na zona da escavação, observando-se um rebaixamento de 1,3 m na zona envolvente à obra.

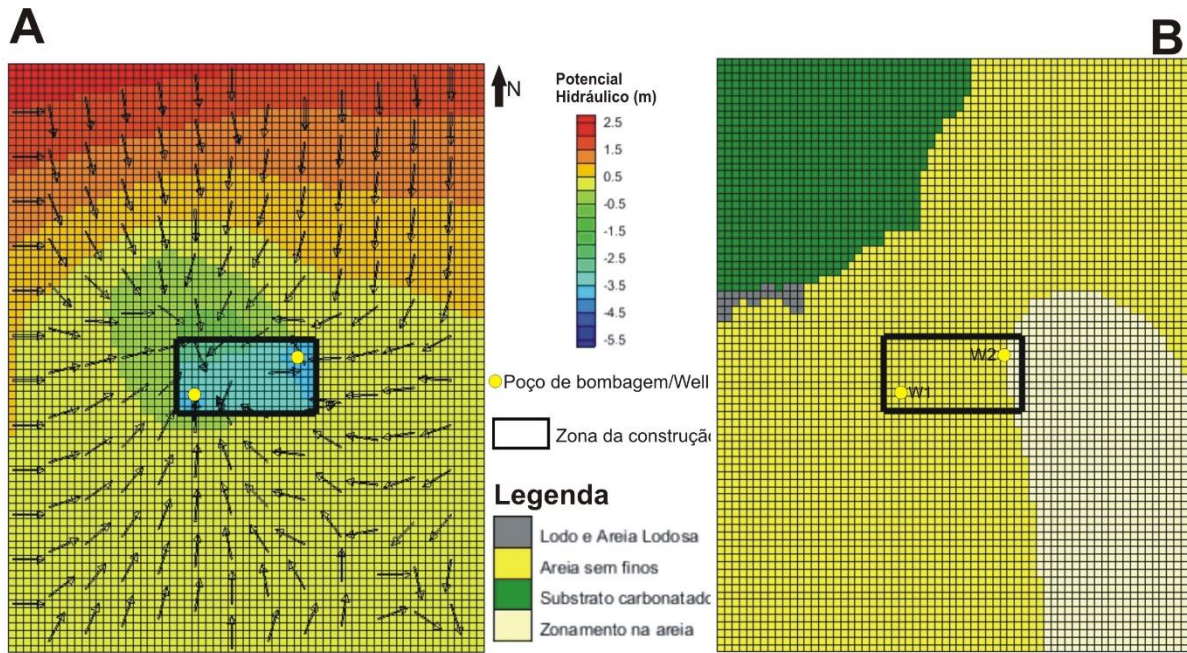


Figura V. 20. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, recorrendo a dois poços de bombagem (A) e litologia da respetiva camada (B).

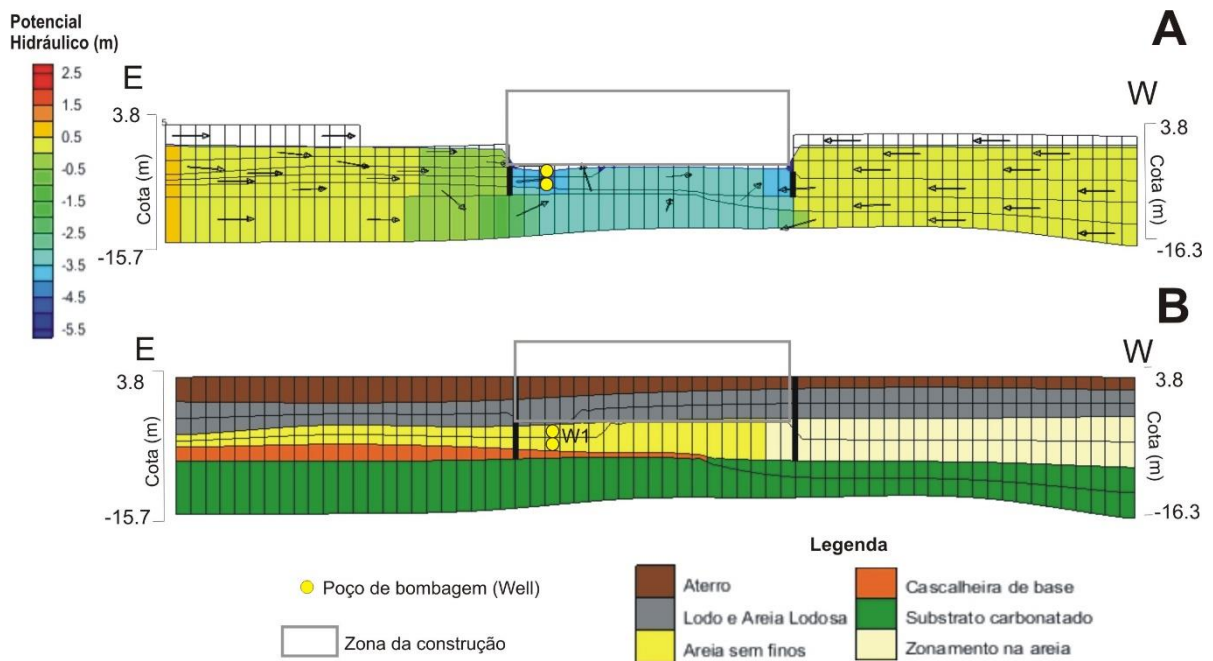


Figura V. 21. Perfil E-W na zona do poço de bombagem W1. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, considerando-se dois poços de bombagem; B) Perfil litológico correspondente.

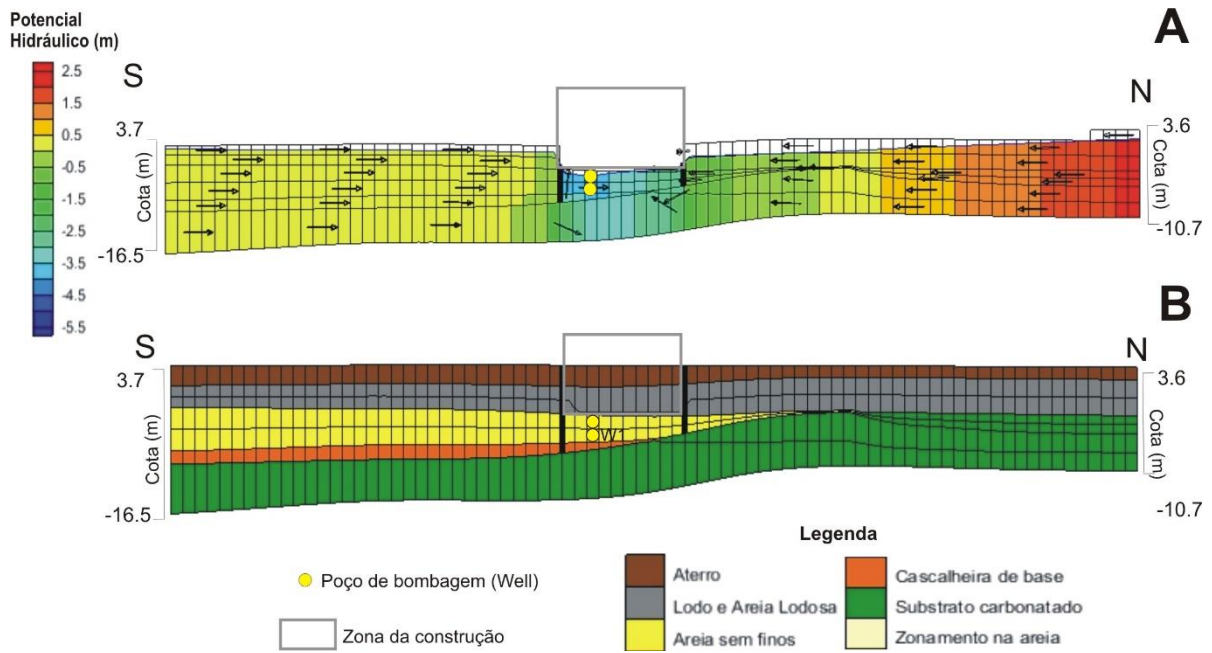


Figura V. 22. Perfil S-N na zona do poço de bombagem W1. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação, considerando-se dois poços de bombagem; B) Perfil litológico correspondente.

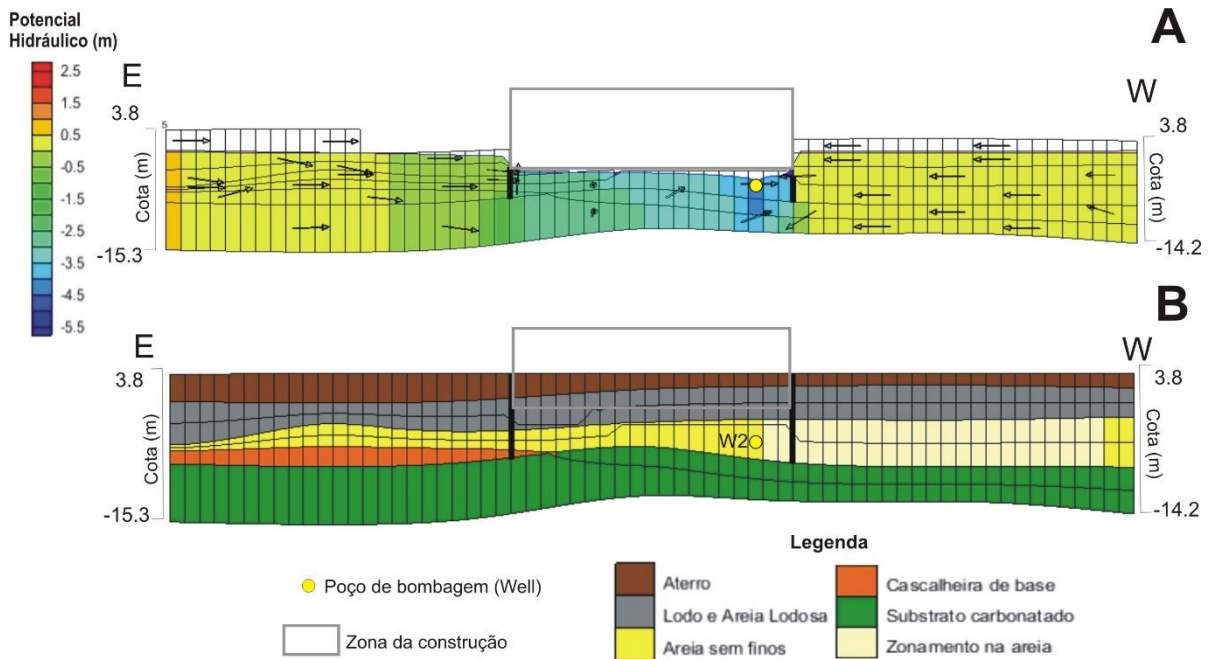


Figura V. 23. Perfil E-W na zona do poço de bombagem W2. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, considerando-se dois poços de bombagem; B) Perfil litológico correspondente.

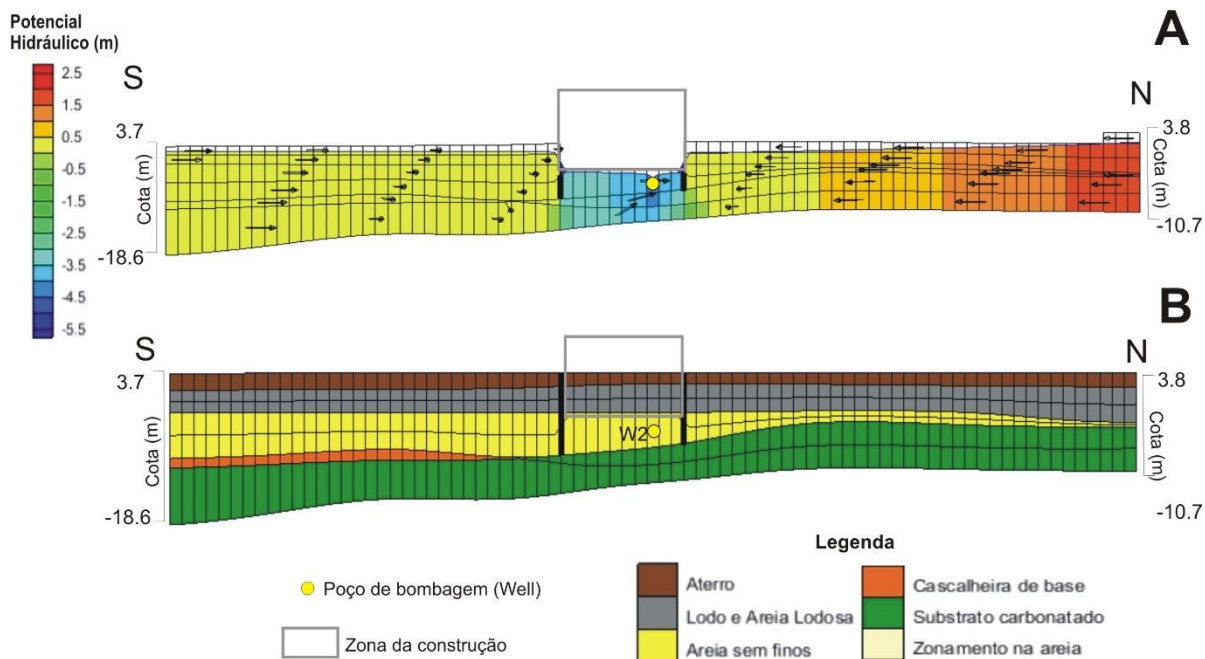


Figura V. 24. Perfil S-N na zona do poço de bombagem W2. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de escavação da obra, considerando-se dois poços de bombagem; B) Perfil litológico correspondente.

A análise das imagens anteriores permite verificar que a introdução de dois poços, com as condições descritas, na zona de escavação, permite a existência de condições de segurança na mesma, pois o nível de água, tal como na condição com dois drenos, encontra-se abaixo da cota de -2,7 m.

Da comparação dos resultados obtidos nas várias simulações, representativas da fase de escavação (Tabela V.7), conclui-se que o caudal de extração necessário para se realizar a escavação a seco é cerca de 1,6 a 1,7 L/s. Com a condição de potencial constante no fundo de escavação obteve-se um caudal mais baixo (1,5 L/s), no entanto, o comportamento dos níveis de água é pouco realista, pois numa obra é pouco provável conseguir-se manter o nível de água completamente nivelado à mesma cota em toda a área. A condição de dreno e de furo de bombagem apresentam resultados mais aproximados à realidade de uma obra. Contudo, dadas as semelhanças nos resultados (discrepâncias entre 6% e 12%), considera-se que a fase de escavação pode ser simulada utilizando qualquer uma das três condições de fronteira analisadas, uma vez que, para o caso de estudo definido, as diferenças são pouco significativas.

Tabela V. 7. Tabela comparativa dos resultados obtidos nas simulações representativas da fase final de escavação.

Condição de fronteira no fundo de escavação	Caudal de extração (L/s)	Cota do nível de água no interior da obra (m)	Rebaixamento máximo na zona envolvente da obra (m)
Potencial constante	1,5	-2,8	1,3
1 Dreno	1,3	Entre -5,3 e -2,1	1,1
2 Drenos	1,6	Entre -4,3 e -2,7	1,4
2 poços de bombagem	1,7	Entre -4,4 e -2,8	1,3

V.3. Análise de sensibilidade

Com o objetivo de avaliar os fatores que contribuem para o aumento do impacto hidrogeológico decorrente da construção da cave considerada no caso de estudo teórico, procedeu-se a uma análise de sensibilidade relativamente aos parâmetros hidráulicos e às condições de fronteira assumidos anteriormente no modelo. Salienta-se que, durante as análises de sensibilidade, que a seguir se apresentam, não se efetuou a calibração dos níveis de água de acordo com os valores definidos para os piezómetros.

V.3.1. Diminuição da condutividade hidráulica da areia

Para a primeira análise de sensibilidade, admitiu-se uma diminuição da condutividade hidráulica da areia sem finos, relativamente aos valores obtidos para o estudo do caso de estudo teórico (1×10^{-4} e 5×10^{-3} m/s), para um valor uniforme de 3×10^{-5} m/s. De notar que, as condições de fronteira nos limites do modelo não sofreram alterações, isto é, admitiu-se um valor de potencial hidráulico variável entre 1,8 e 2,3 m no limite norte e entre 0,4 e 0,5 m no limite sul à semelhança do caso de estudo teórico.

Nas Figuras V.25, V.26 e V.27 apresentam-se os resultados obtidos para a fase de referência considerando a areia menos permeável e com propriedades hidráulicas uniformes. Os valores de condutividade hidráulica introduzidos no modelo podem ser observados no Tabela V.8.

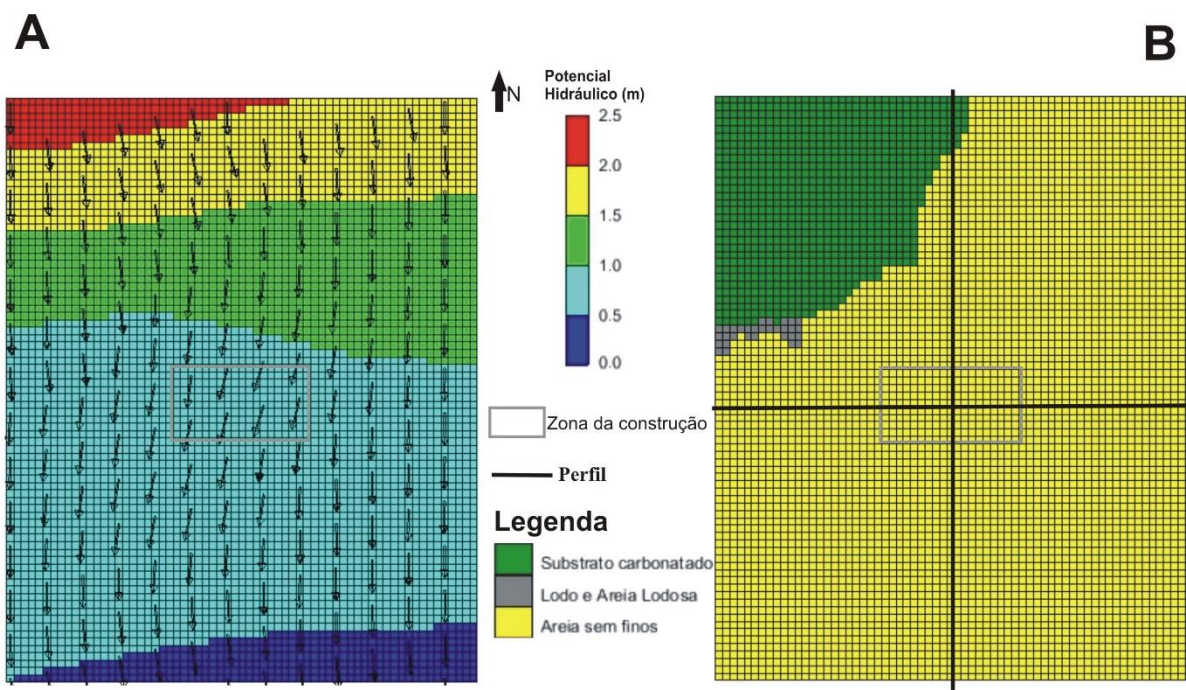


Figura V. 25. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando a areia uniforme e menos permeável (A) e litologia da respetiva camada (B).

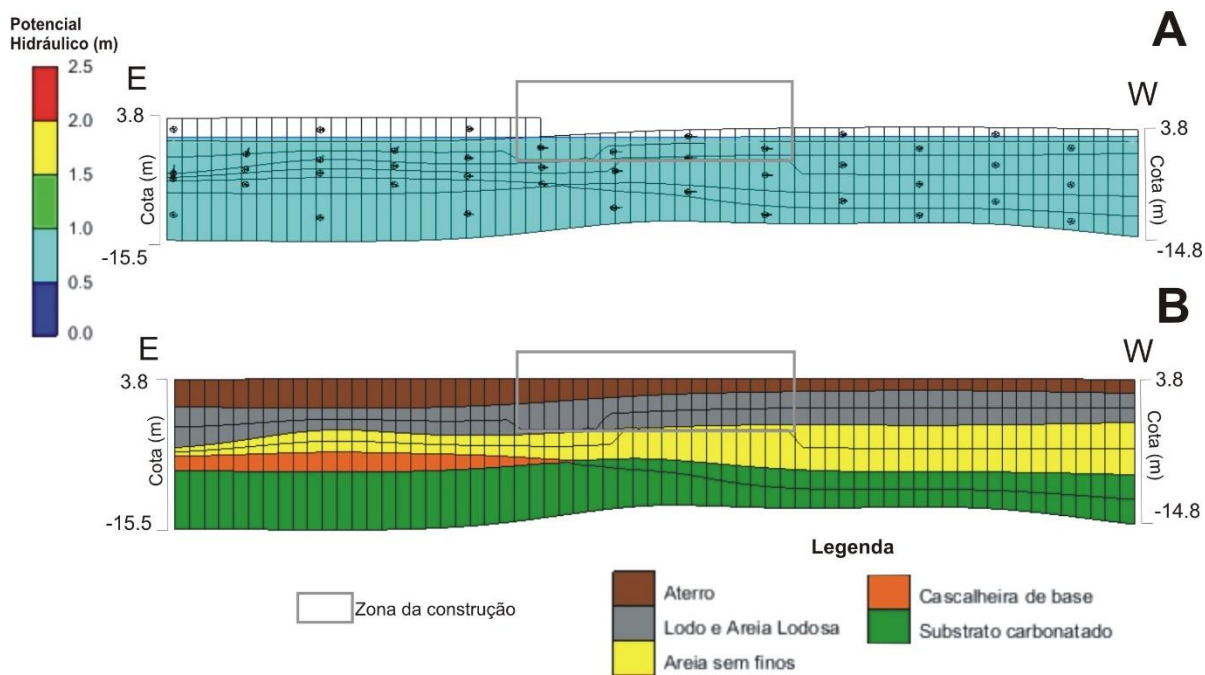


Figura V. 26. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e velocidade de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando a areia uniforme e menos permeável; B) Perfil litológico correspondente.

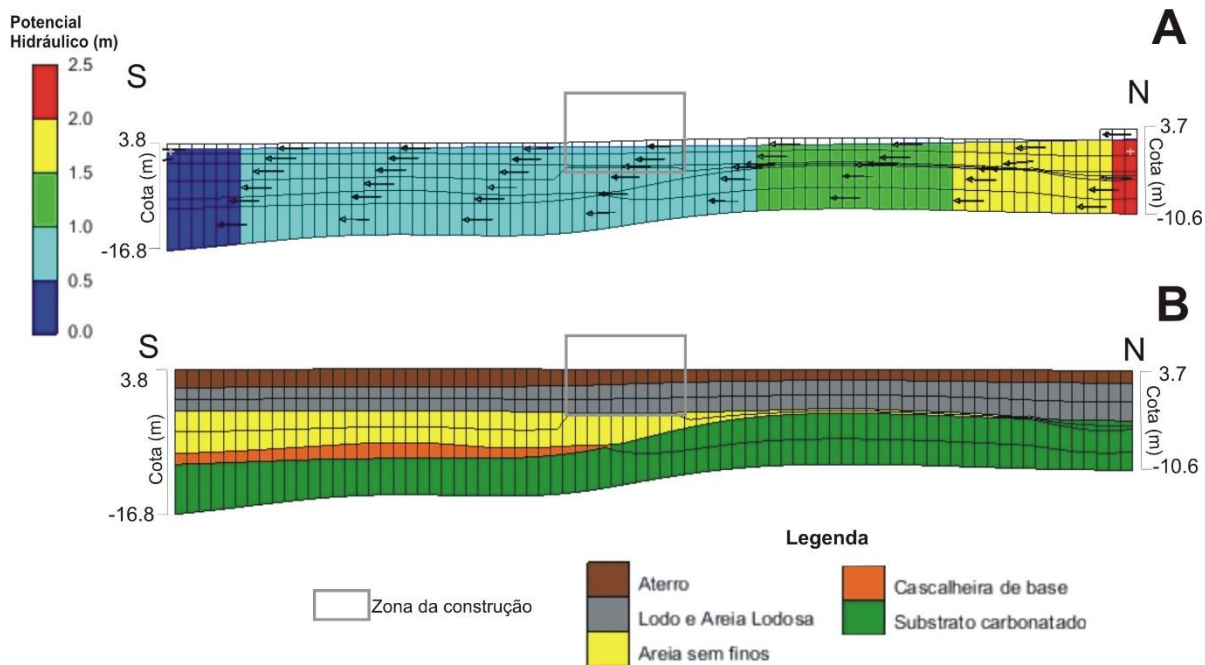


Figura V. 27. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando a areia uniforme e menos permeável; B) Perfil litológico correspondente.

Tabela V. 8. Condutividades hidráulicas introduzidas no modelo numérico da fase de referência considerando a areia uniforme e menos permeável.

Material	K (m/s)
Aterro	2×10^{-5}
Lodo e Areia lodosa	3×10^{-7}
Areia sem finos	3×10^{-5}
Cascalheira de base	9×10^{-7}
Substrato carbonatado	3×10^{-6}

De acordo com a Figura V.25, verifica-se que para as condições analisadas o escoamento subterrâneo se processa unicamente na direção do rio, ou seja, de N para S, devido à areia apresentar características uniformes (homogêneas). Para esta situação, obteve-se uma velocidade máxima do fluxo de $5,5 \times 10^{-9}$ m/s e um caudal de circulação no modelo de 0,14 L/s.

Uma vez que nesta simulação não se alteraram as condições de fronteira, os níveis de água variam, em geral, entre as cotas 0,4 m e 2,3 m. Na zona da construção, o potencial hidráulico varia entre 0,73 e 0,94 m, sendo o caudal de circulação de 0,01 L/s.

A partir do modelo da fase de referência simulou-se o potencial impacte produzido pela construção da estrutura subterrânea definida para o caso de estudo teórico.

Os resultados obtidos para a fase definitiva, considerando a areia uniforme e menos permeável, apresentados nas Figuras V.28, V.29 e V.30, indicam sentidos de fluxo semelhantes aos obtidos para a fase de referências, com exceção da zona envolvente ao edifício, onde ocorre um desvio do fluxo devido à presença da estrutura impermeável. Após a construção prevêem-se velocidades do fluxo de água muito semelhantes às obtidas para a fase de referência (máx. $5,3 \times 10^{-9}$ m/s).

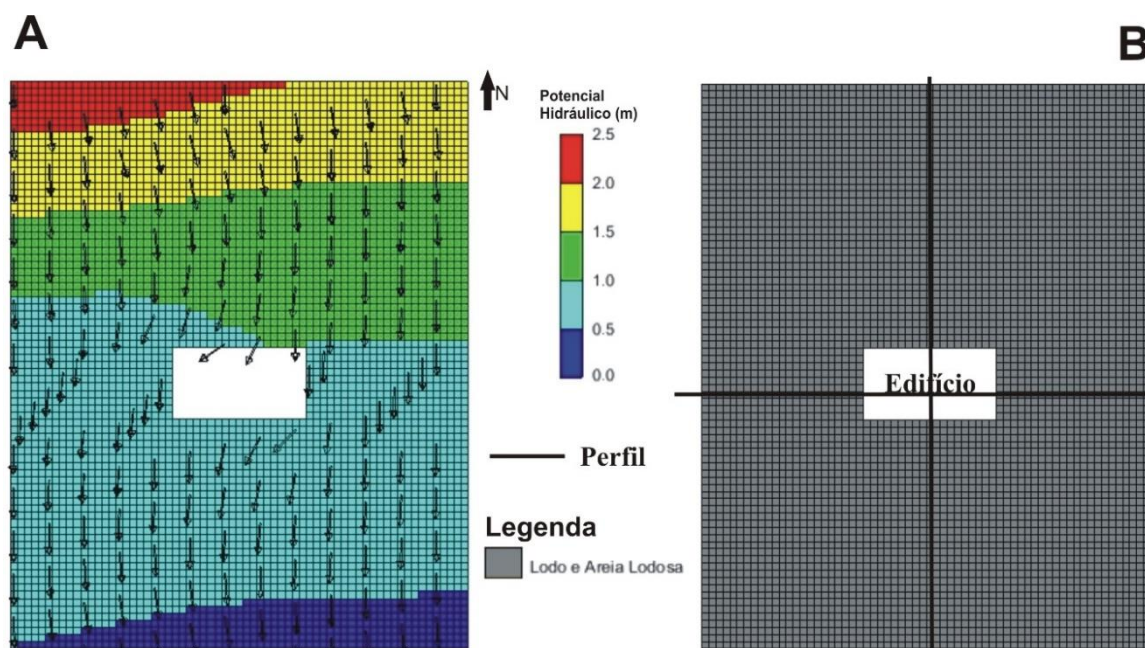


Figura V. 28. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 2, resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando a areia uniforme e menos permeável (A) e litologia da respetiva camada (B).

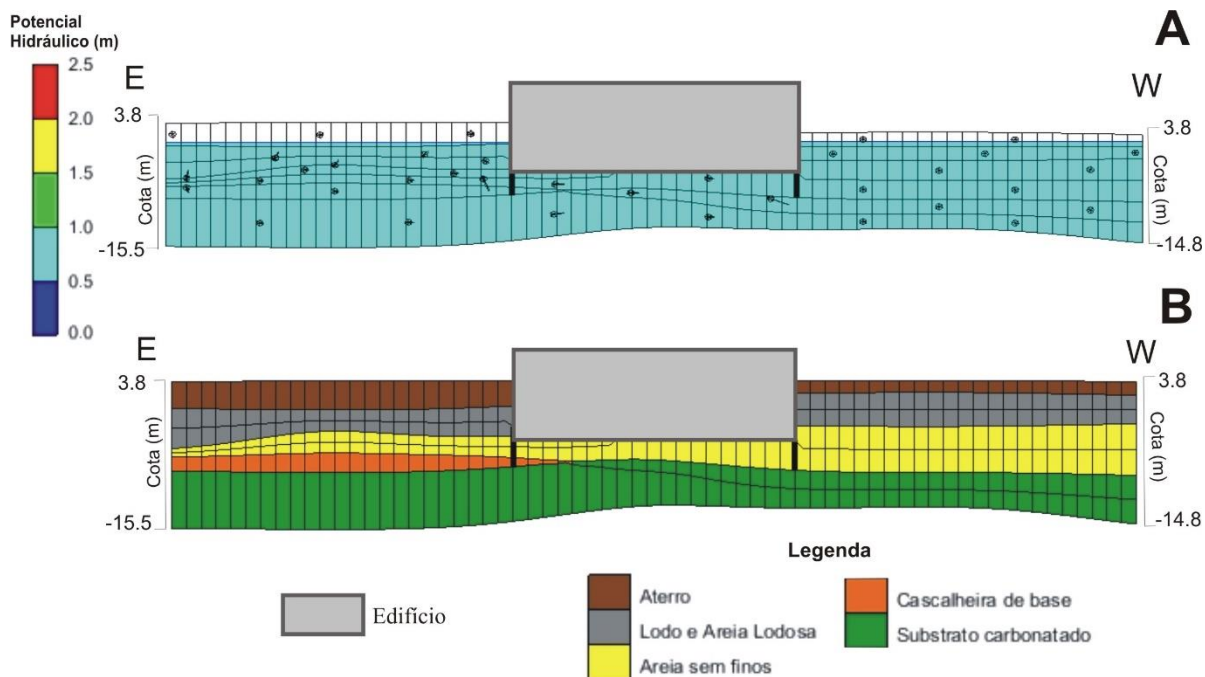


Figura V. 29. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva considerando a areia uniforme e menos permeável; B) Perfil litológico correspondente.

Na zona envolvente à construção, prevê-se que potencial hidráulico deva variar entre 0,70 m (a jusante) e 1,01 m (a montante), devendo o caudal na zona de implantação do edifício reduzir para um valor de 0,003 L/s, ou seja, irá ocorrer uma diminuição de 0,007 L/s relativamente às condições iniciais (fase de referência) devido ao efeito barreira. Na base do edifício, estima-se que a água subterrânea atinja uma pressão máxima equivalente a uma coluna de água com 3,6 m de altura.

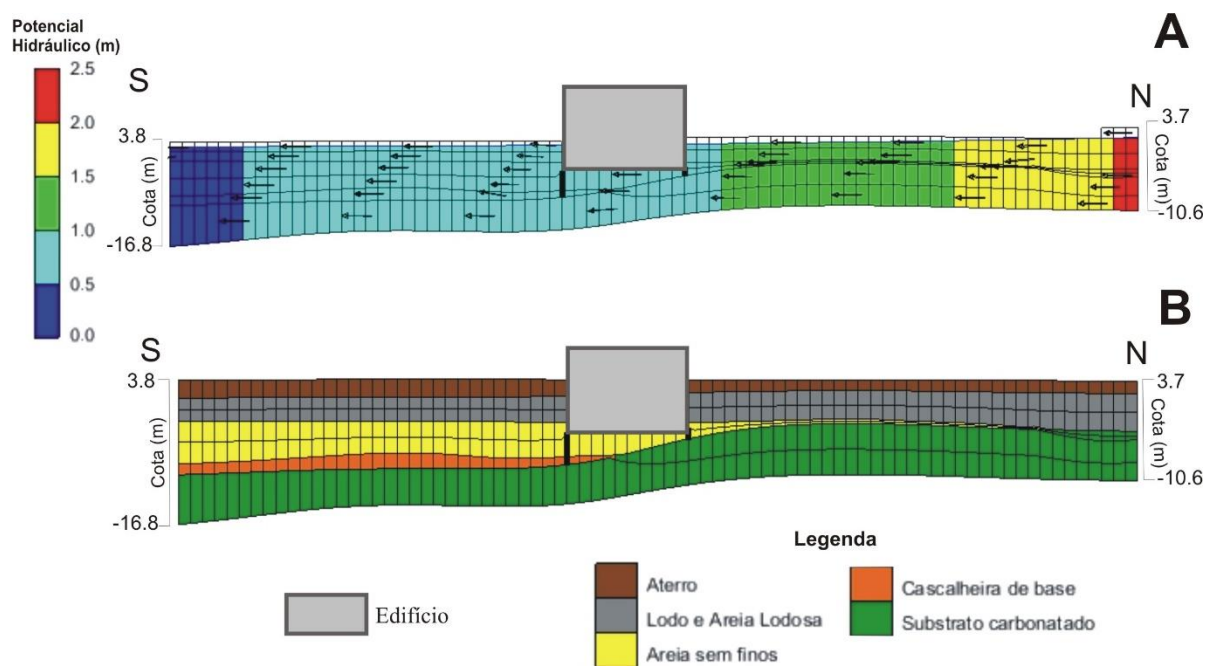


Figura V. 30. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando a areia uniforme e menos permeável; B) Perfil litológico correspondente.

O impacto hidrogeológico associado à construção do edifício, apresentado na Figura V.31, foi obtido através da comparação da piezometria da fase definitiva e da fase de referência.

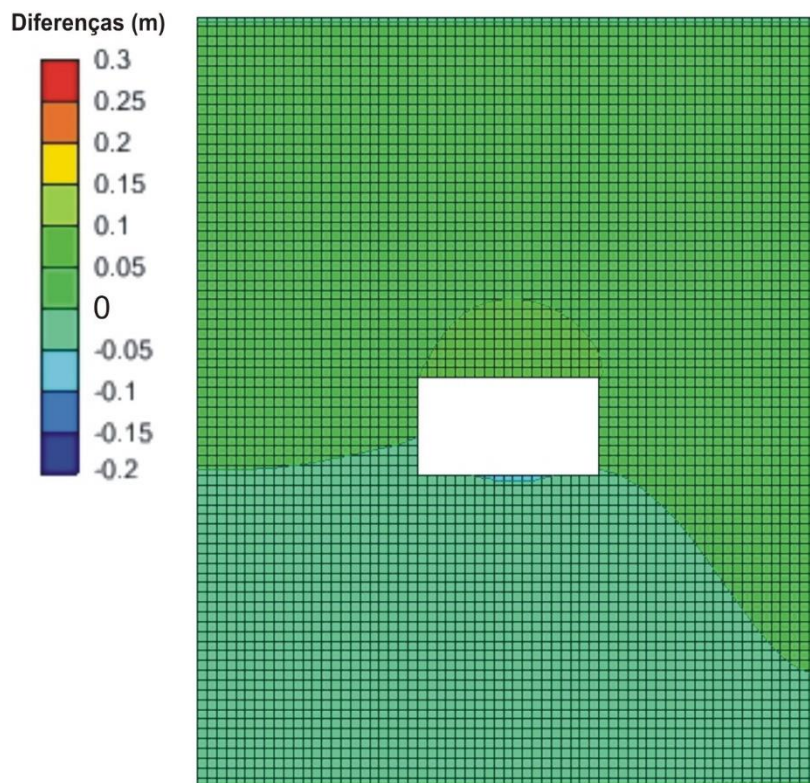


Figura V. 31. Diferença entre o potencial hidráulico obtido na fase definitiva e o obtido na fase de referência na camada 2 do modelo, considerando a areia uniforme e menos permeável.

Com base na Figura V.31 verifica-se que, para as condições analisadas, após a construção da estrutura subterrânea os níveis de água deverão ser muito semelhantes aos obtidos na fase de referência, ocorrendo subidas máximas de 0,08 m a montante e descidas de 0,05 m a jusante do edifício.

Conclui-se, assim, que relativamente ao caso de estudo teórico a diminuição da condutividade hidráulica e a uniformização da areia sem finos produz um aumento pouco significativo do impacto hidrogeológico.

V.3.2. Aumento da condutividade hidráulica da areia

Na segunda análise de sensibilidade, avaliou-se o efeito de a areia sem finos apresentar uma condutividade hidráulica mais elevada, tendo-se considerado um valor uniforme de 5×10^{-3} m/s. Para esta análise, assumiram-se, igualmente, condições de fronteira nos limites do modelo semelhantes às do caso de estudo teórico, ou seja, um valor de potencial hidráulico variável entre 1,8 e 2,3 m no limite norte e entre 0,4 e 0,5 m no limite sul.

Nas Figuras V.32, V.33 e V.34 apresentam-se os resultados obtidos para a fase de referência considerando a areia uniforme e mais permeável, e na Tabela V.9 os valores de condutividade hidráulica admitidos no modelo.

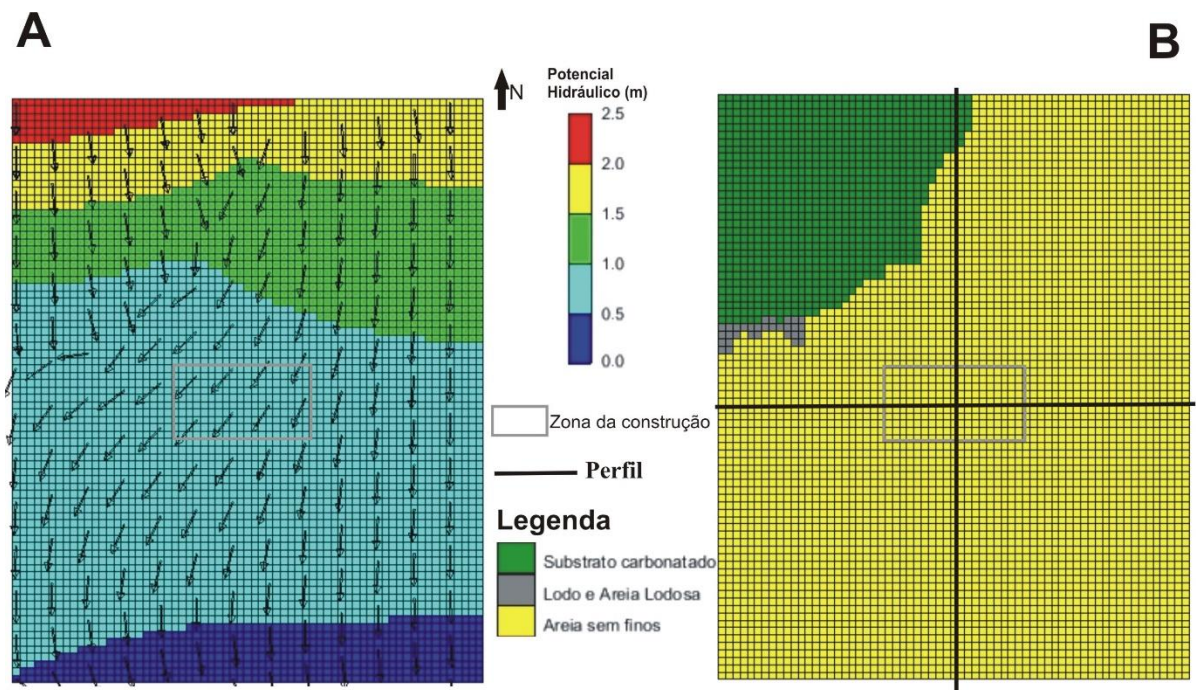


Figura V. 32. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando a areia uniforme e mais permeável (A) e litologia da respectiva camada (B).

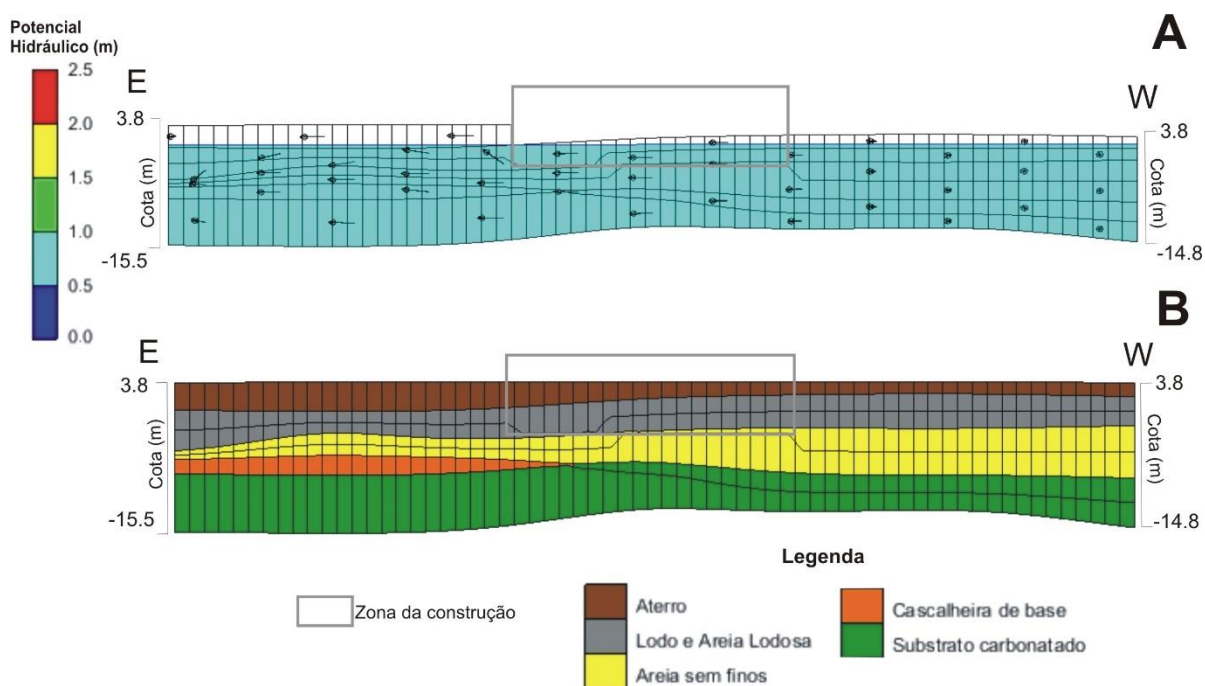


Figura V. 33. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência considerando, a areia uniforme e mais permeável; (B) Perfil litológico correspondente.

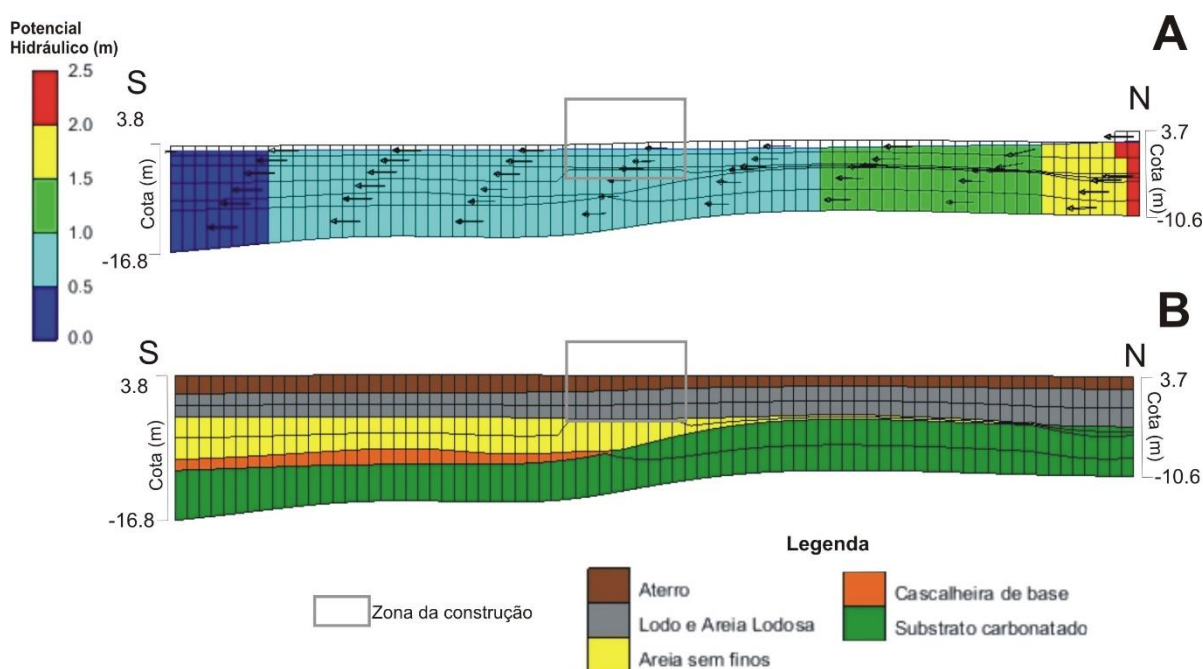


Figura V. 34. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando a areia uniforme e mais permeável; B) Perfil litológico correspondente.

Tabela V. 9. Condutividades hidráulicas introduzidas no modelo da fase de referência, considerando a areia uniforme e mais permeável.

Material	K (m/s)
Aterro	2×10^{-5}
Lodo e Areia lodosa	3×10^{-7}
Areia sem finos	5×10^{-3}
Cascalheira de base	9×10^{-7}
Substrato carbonatado	4×10^{-7}

De acordo com a Figura V.32, verifica-se que para as condições admitidas, o escoamento subterrâneo apresenta uma direção geral de N para S, ocorrendo também fluxo de NE para SW na zona de implantação da obra devido ao aumento da condutividade hidráulica da areia aliado à presença de maciço rochoso a cotas mais altas, com uma condutividade hidráulica mais baixa.

Para estas condições, obteve-se uma velocidade máxima do fluxo de $1,5 \times 10^{-6}$ m/s, bem como um caudal de circulação no modelo de 15 L/s, sendo substancialmente superior ao obtido na análise anterior e no caso de estudo teórico.

Tal como a análise anterior, como não se alteraram as condições de fronteira, o potencial hidráulico varia, em geral, entre as cotas 0,4 e 2,3 m, enquanto na zona da construção varia entre as cotas 0,64 e 0,84 m, sendo o caudal de circulação de 4,7 L/s.

A partir do modelo da fase de referência simulou-se o potencial impacte produzido pela construção da estrutura subterrânea definida para o caso de estudo teórico.

Os resultados obtidos para a fase definitiva considerando a areia uniforme e mais permeável são apresentados nas Figuras V.35, V.36 e V.37 e sugerem, tal como na simulação anterior, sentidos de fluxo semelhantes aos obtidos para a fase de referência, com exceção da zona envolvente ao edifício, onde ocorre um desvio do fluxo devido à presença da estrutura impermeável. Após a construção prevê-se que as velocidades do fluxo de água atinjam, igualmente, $1,5 \times 10^{-6}$ m/s.

O potencial hidráulico na zona circundante ao edifício deverá variar entre 0,58 m (a jusante) e 1,0 m (a montante) e o caudal na zona de implantação do edifício será reduzido para um valor de 0,04 L/s, ou seja, irá ocorrer uma diminuição de 4,66 L/s relativamente às condições iniciais (fase de referência) devido ao efeito barreira.

Na base do edifício, prevê-se que a água subterrânea atinja uma pressão máxima equivalente a uma coluna de água com 3,48 m de altura.

Por forma a quantificar o impacte hidrogeológico produzido pela construção, comparou-se a piezometria da fase definitiva à da fase de referência, tendo-se obtido o resultado apresentado na Figura V.38.

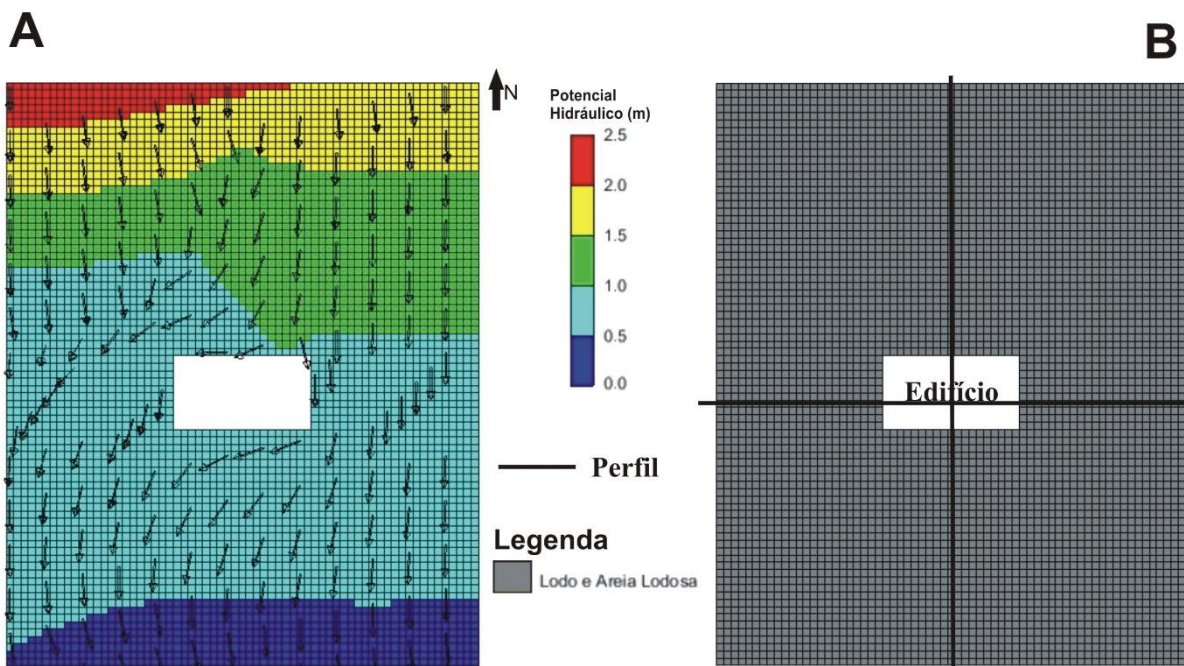


Figura V. 35. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 2, resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando a areia uniforme e mais permeável (A) e litologia da respetiva camada (B).

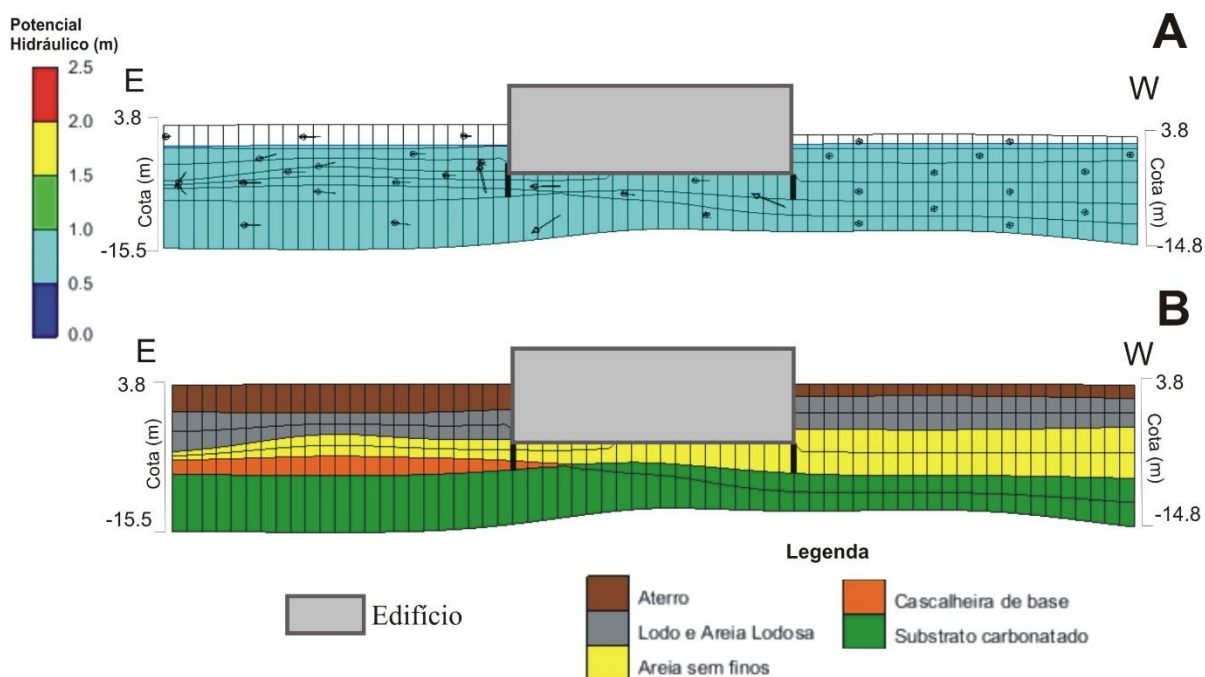


Figura V. 36. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação da fase definitiva, considerando a areia uniforme e mais permeável; B) Perfil litológico correspondente.

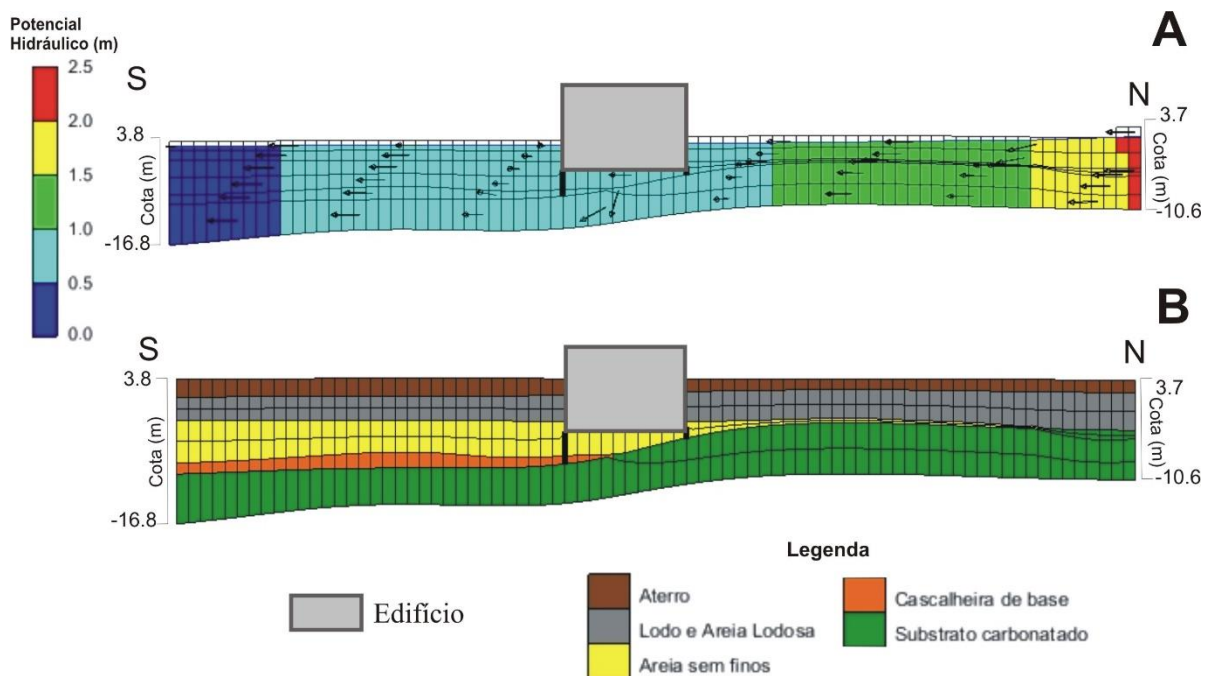


Figura V. 37. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação da fase definitiva, considerando a areia uniforme e mais permeável; B) Perfil litológico correspondente.

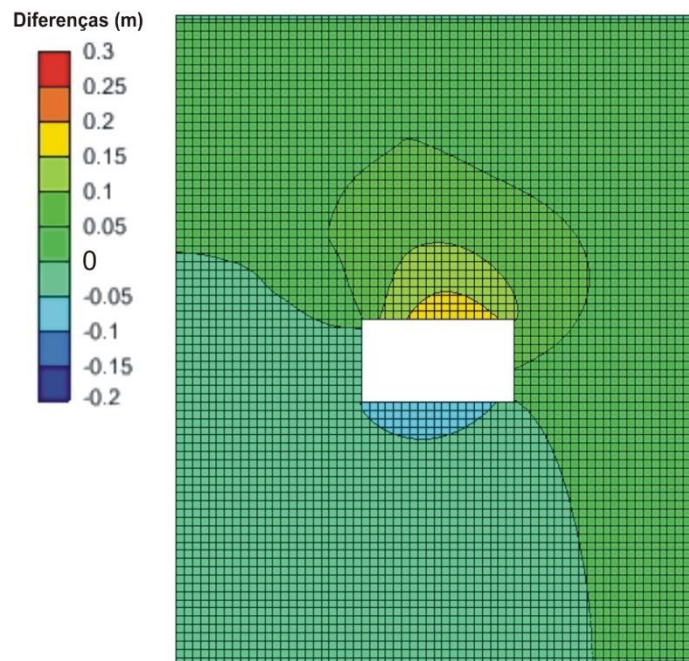


Figura V. 38. Diferença entre o potencial hidráulico obtido na fase definitiva e o obtido na fase de referência na camada 2, considerando a areia uniforme e mais permeável.

Com base na Figura V.38 constata-se que, para a situação analisada, após a construção da estrutura subterrânea os níveis de água deverão ser 0,18 m mais elevados a montante do edifício e 0,07 m mais baixos a jusante do mesmo do que na situação de referência.

Conclui-se, assim, que comparativamente ao caso de estudo teórico o aumento da condutividade hidráulica e uniformização da areia sem finos potencia um aumento significativo do impacto hidrogeológico.

V.3.3. Diminuição da condutividade hidráulica do substrato

Na terceira análise de sensibilidade, diminuiu-se a condutividade hidráulica do substrato rochoso cerca de uma ordem de grandeza relativamente ao caso de estudo teórico, ou seja, considerou-se um valor de 4×10^{-7} m/s. Nesta simulação manteve-se o zonamento na areia (Tabela V.10), bem como as condições de fronteira nos limites do modelo, ou seja, potencial hidráulico variável entre 1,8 e 2,3 m no limite norte e entre 0,4 e 0,5 m no limite sul. Os resultados obtidos para a fase de referência considerando o substrato menos permeável são apresentados nas Figuras V.39, V.40 e V.41.

A análise da Figura V.39 permite verificar, que para as condições analisadas o escoamento é semelhante ao caso de estudo teórico, uma vez que se mantiveram as condutividades hidráulicas na areia, observando-se fluxo de N para S e também de NW para SE na direção da zona mais permeável na areia onde se determinou uma velocidade máxima de $5,5 \times 10^{-8}$ m/s. O caudal de circulação no modelo é de 0,8 L/s, ou seja, ligeiramente inferior ao caso de estudo teórico.

Os níveis de água variam em geral entre 0,4 m e 2,3 m, como seria de esperar, e no local da obra entre 0,43 e 0,49 m, sendo o caudal de circulação nessa zona até à base do modelo de 0,05 L/s.

Tabela V. 10. Condutividades hidráulicas introduzidas no modelo numérico da fase de referência, considerando o substrato menos permeável.

Material	K (m/s)
Aterro	2×10^{-5}
Lodo e Areia lodosa	3×10^{-7}
Areia sem finos	1×10^{-4}
Cascalheira de base	9×10^{-7}
Substrato carbonatado	4×10^{-7}
Zonamento na areia	5×10^{-3}

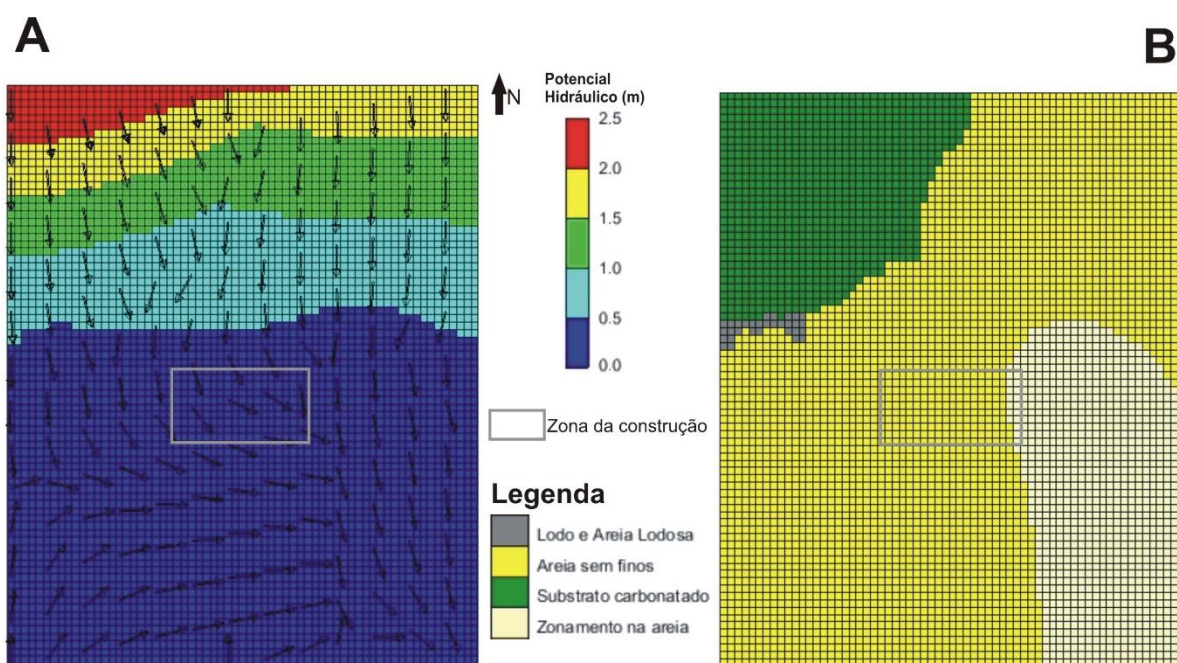


Figura V. 39. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando o substrato menos permeável (A) e litologia da respetiva camada (B).

Os resultados obtidos após a introdução da estrutura enterrada no modelo (fase definitiva da obra) são exibidos nas Figuras V.42, V.43 e V.44 e sugerem direções de fluxo semelhantes às visualizadas na fase de referência, com exceção da zona circundante ao edifício. Determinou-se, igualmente, uma velocidade máxima do fluxo semelhante à obtida na fase de referência, ou seja, de $5,5 \times 10^{-8}$ m/s.

O potencial hidráulico na envolvente do edifício deverá variar entre 0,43 e 0,53 m, e o caudal, na zona de implantação do edifício, deverá reduzir para 0,001 L/s, ou seja, irá ocorrer uma diminuição de 0,049 L/s relativamente à situação inicial. Nestas condições, a água subterrânea deverá exercer uma pressão máxima na base do edifício equivalente a uma coluna de água com 3,18 m de altura.

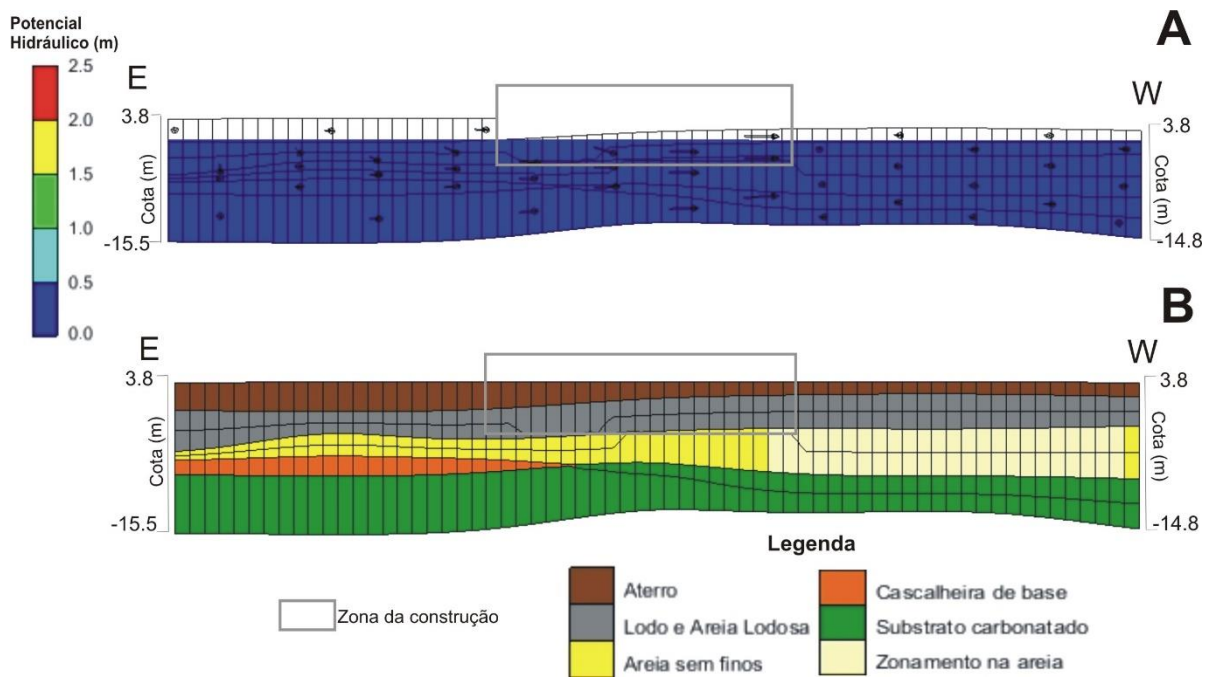


Figura V. 40. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando o substrato menos permeável; B) Perfil litológico correspondente.

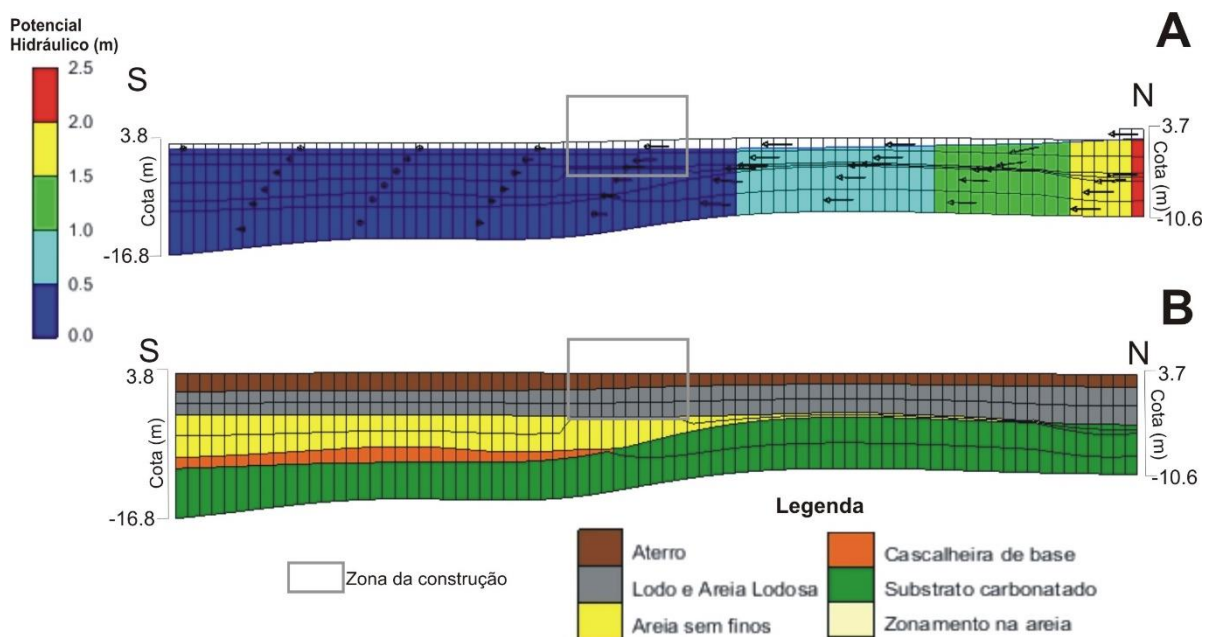


Figura V. 41. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando o substrato menos permeável; B) Perfil litológico correspondente.

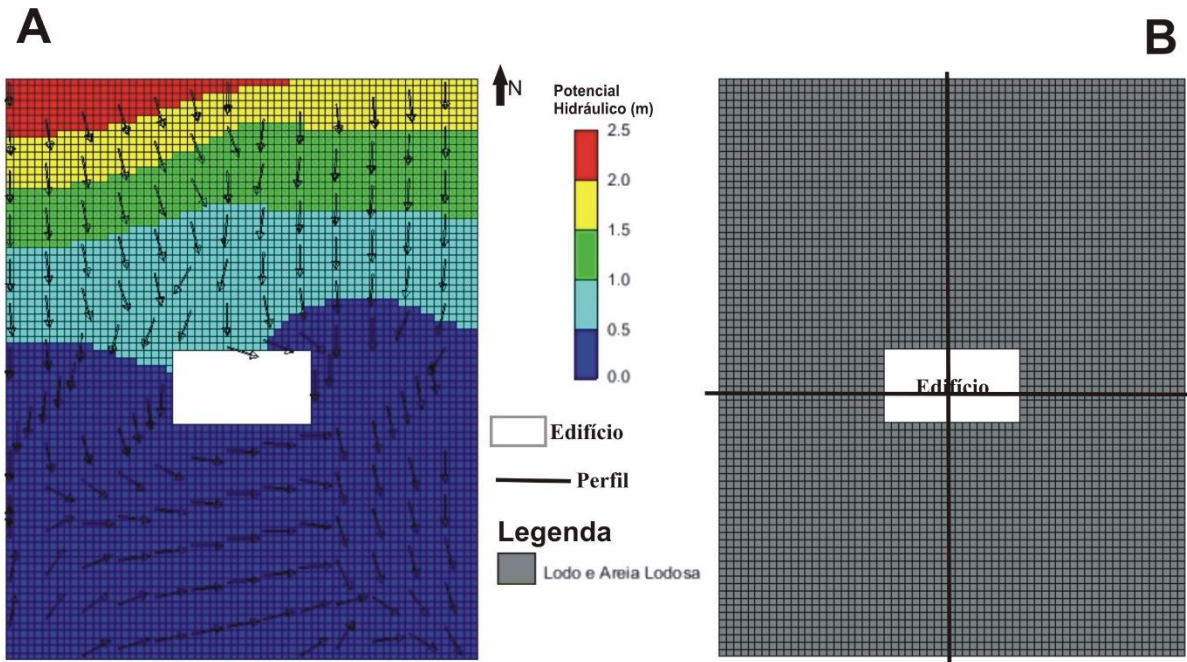


Figura V. 42. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 2, resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando o substrato menos permeável(A) e litologia da respectiva camada (B).

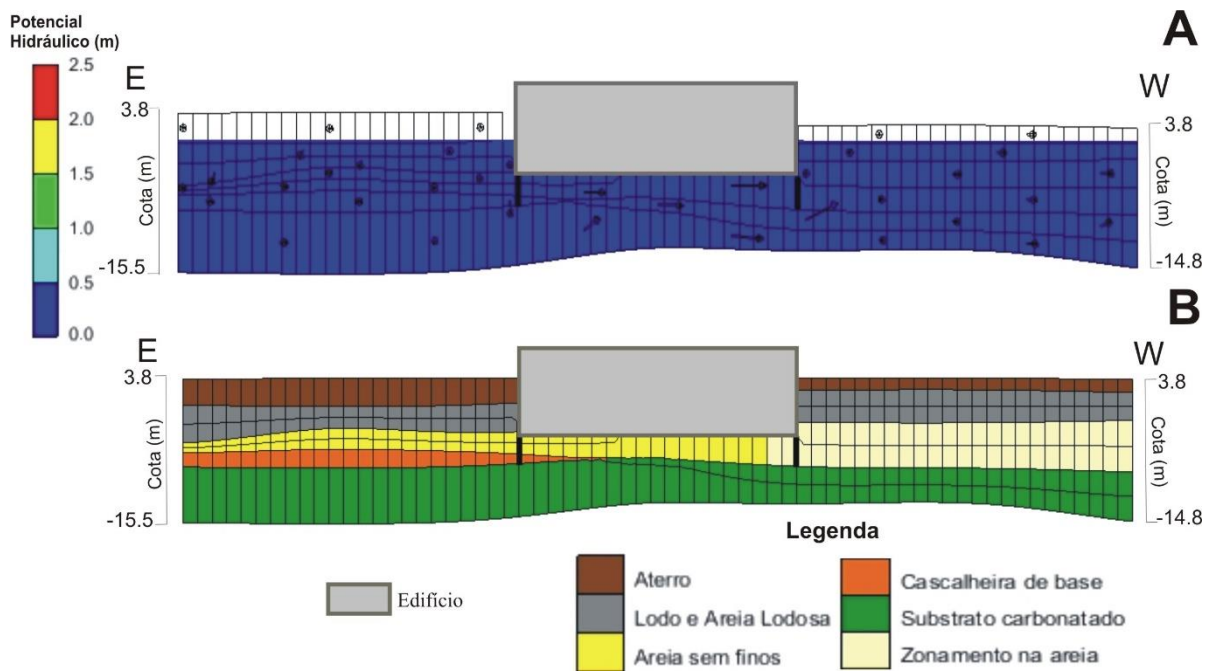


Figura V. 43. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando o substrato menos permeável; B) Perfil litológico correspondente.

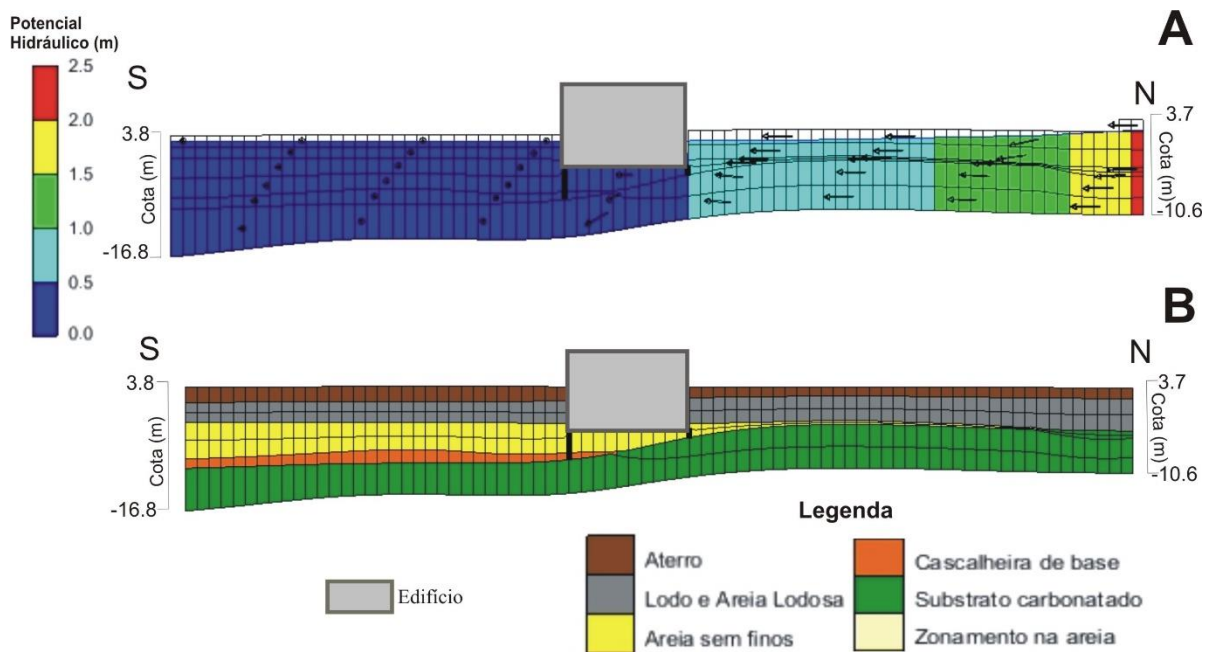


Figura V. 44. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando o substrato menos permeável; B) Perfil litológico correspondente.

Com o intuito de quantificar o impacte hidrogeológico provocado pela construção do edifício, nas condições analisadas, comparou-se o potencial hidráulico obtido na simulação da fase definitiva com o obtido na simulação da fase de referência, tendo-se obtido o resultado visível na Figura V.45.

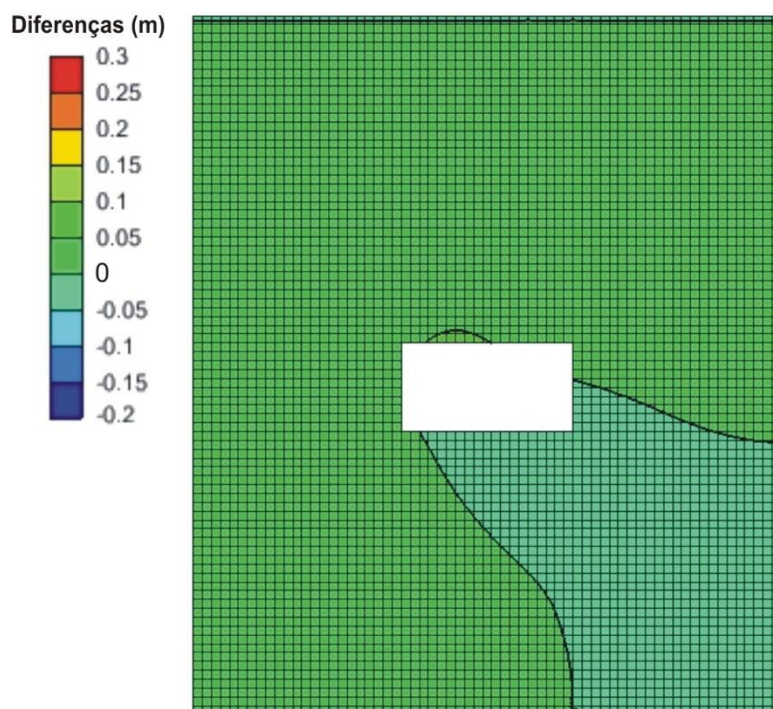


Figura V. 45. Diferença entre o potencial hidráulico obtido na fase definitiva e o obtido na fase de referência na camada 2 do modelo, considerando o substrato menos permeável.

De acordo com a Figura V.45, verifica-se que para estas condições, após a construção da obra, os níveis de água na área de estudo deverão variar pouco, uma vez que se obtiveram subidas de 0,05 m a montante do edifício e descidas de 0,004 m a jusante do mesmo.

Conclui-se, assim, que em relação ao caso de estudo teórico a diminuição da condutividade hidráulica do substrato rochoso não promove impacte hidrogeológico.

V.3.4. Aumento da condição de fronteira de montante

A quarta análise consistiu no aumento do potencial hidráulico especificado no limite norte do modelo (condição de fronteira de montante) para um valor 4,4 m ao longo de toda a extensão da fronteira. No limite sul do modelo, a condição de fronteira manteve-se inalterada, ou seja, potencial hidráulico variável entre 0,4 e 0,5 m. Quanto às condutividades hidráulicas dos materiais, utilizaram-se os valores admitidos no caso de estudo teórico, mantendo o zonamento na areia (Tabela V.3).

Os resultados obtidos, exibidos nas Figuras V.46, V.47 e V.48, indicam direções de fluxo muito semelhantes aos do caso de estudo teórico, com fluxo na direção do rio (para S) e para a zona mais permeável da areia (para SE). Para estas condições, a velocidade máxima do fluxo é $7,7 \times 10^{-8}$ m/s e o caudal de circulação no modelo 1,8 L/s, sendo estes valores mais elevados que os obtidos no caso de estudo analisado.

Em geral, o nível de água varia, nesta situação, entre 0,4 e 4,4 m e, em particular, na zona da obra entre 0,47 e 0,73 m. O caudal de circulação na zona da construção é cerca de 0,2 L/s.

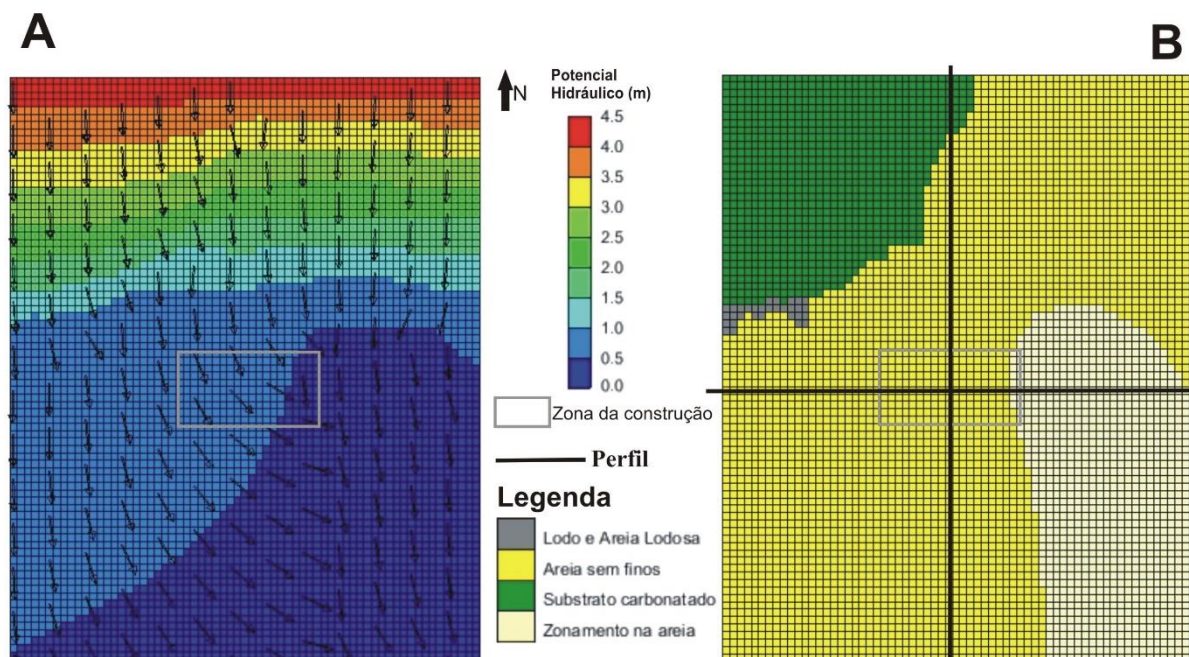


Figura V. 46. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando o aumento da condição de fronteira de montante (A) e litologia da respetiva camada (B).

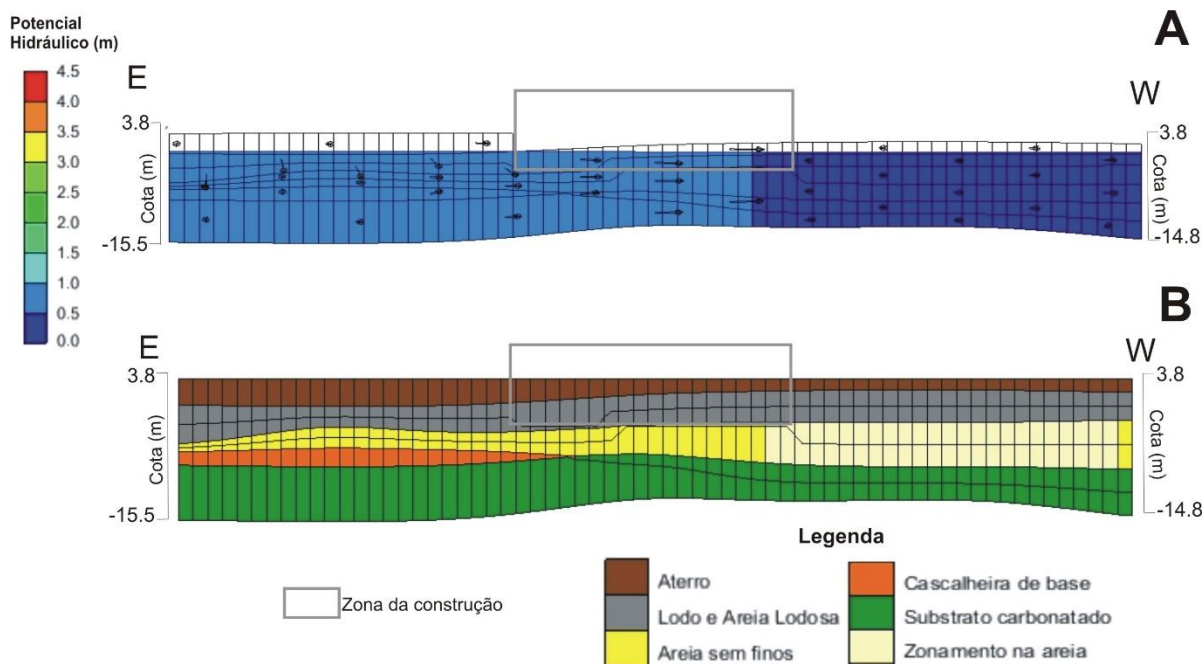


Figura V. 47. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando o aumento da condição de fronteira de montante; B) Perfil litológico correspondente.

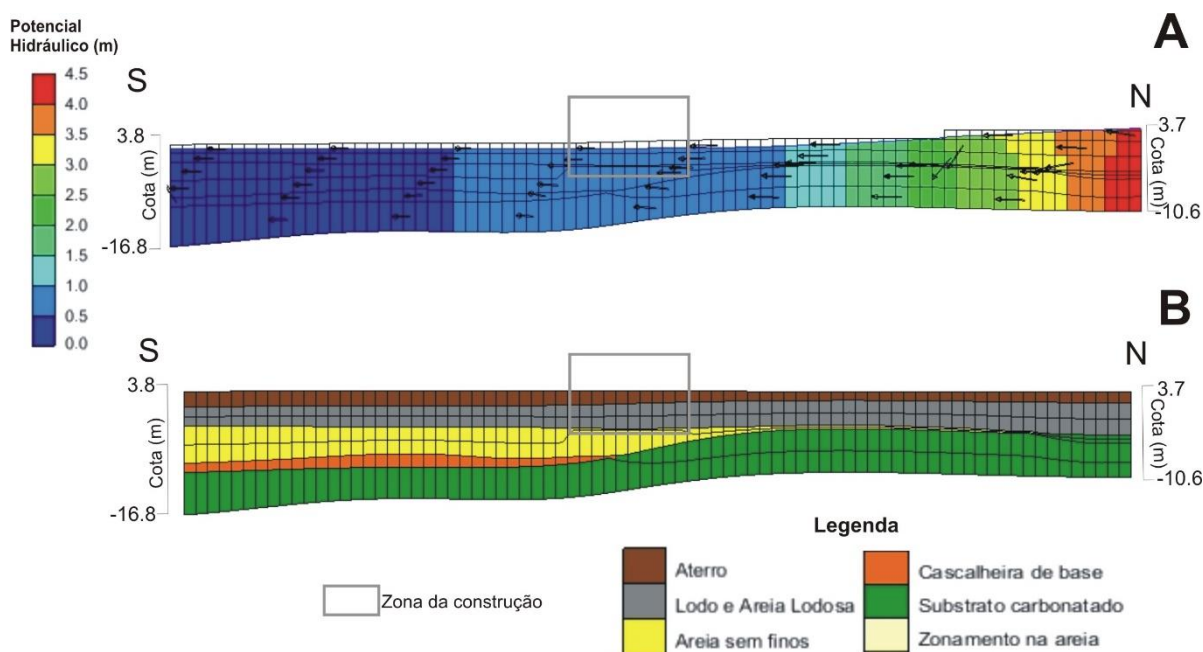


Figura V. 48. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando o aumento da condição de fronteira de montante; B) Perfil litológico correspondente.

Os resultados da simulação realizada após a introdução da estrutura enterrada no modelo (fase definitiva da obra), apresentados nas Figuras V.49, V.50 e V.51, são semelhantes, em termos de direções de fluxo, aos obtidos na fase de referência, com exceção da zona circundante ao edifício. A velocidade máxima do fluxo de água no modelo é idêntica à obtida na fase de referência, ou seja, $7,7 \times 10^{-8}$ m/s.

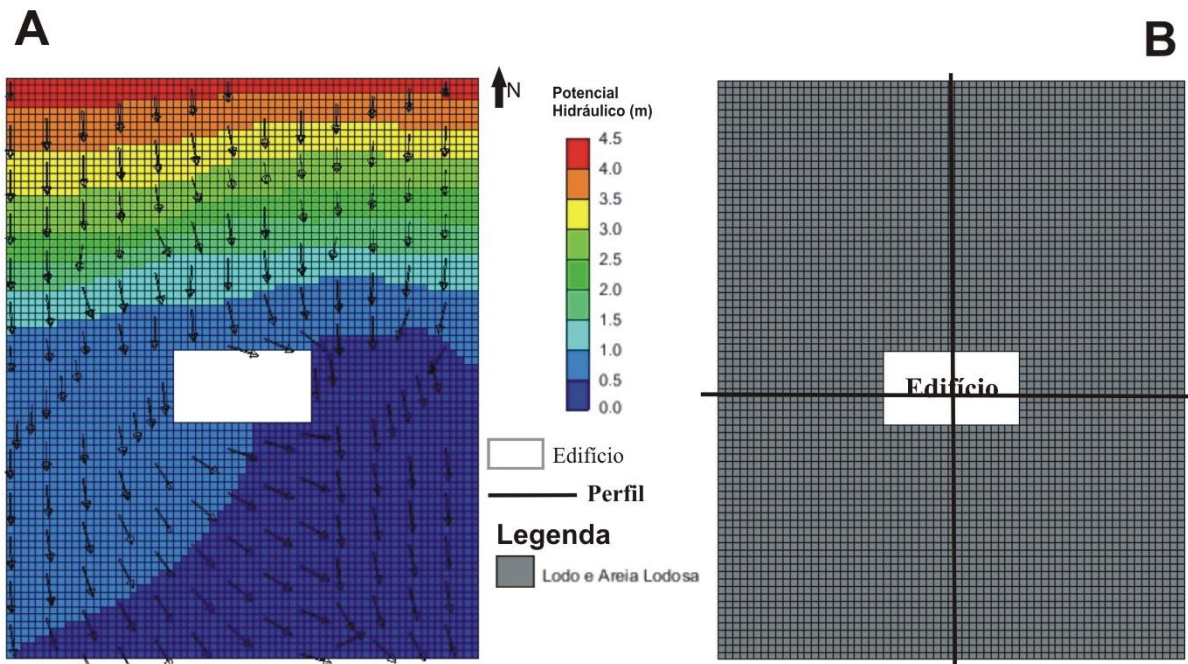


Figura V. 49. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 2, resultantes da simulação numérica da fase definitiva considerando o aumento da condição de fronteira de montante. (A) e litologia da respetiva camada (B).

O potencial hidráulico deverá variar, na envolvente do edifício, entre 0,47 e 0,86 m, e o caudal será, na zona de implantação do edifício, cerca de 0,03 L/s, ou seja, ocorrerá uma diminuição de 1,7 L/s relativamente à situação inicial. Nestas condições, a água subterrânea irá exercer uma pressão máxima na base do edifício equivalente a uma coluna de água com 3,36 m de altura.

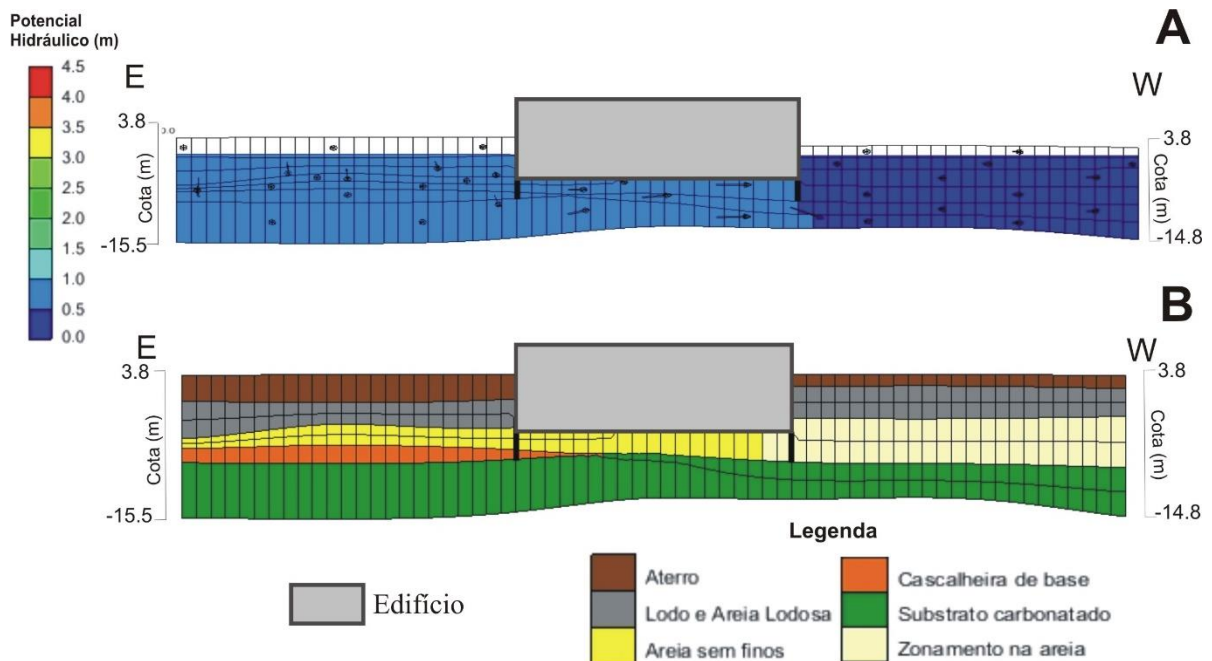


Figura V. 50. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando o aumento da condição de fronteira de montante; B) Perfil litológico correspondente.

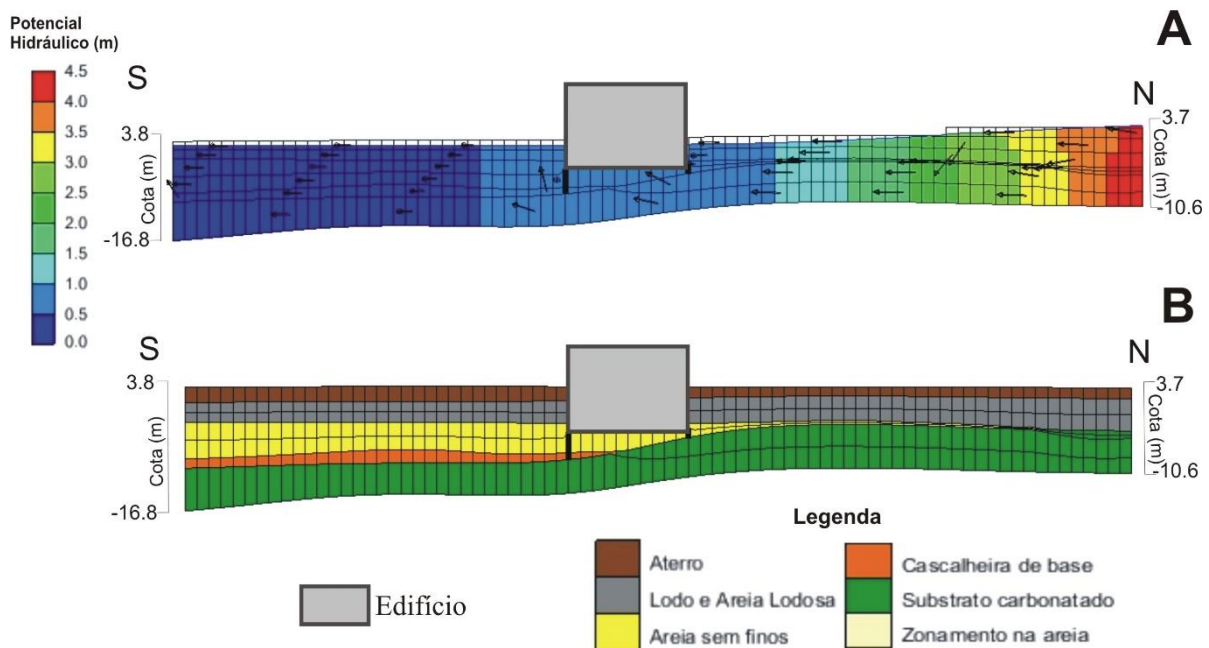


Figura V. 51. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando o aumento da condição de fronteira de montante; B) Perfil litológico correspondente.

Para avaliar o impacto associado à construção do edifício nestas condições, comparou-se a o resultado da fase definitiva com o da fase de referência, tendo-se obtido o resultado expresso na Figura V.52.

A análise da Figura V.52 permite constatar que, após a construção do edifício, os níveis de água, nestas condições, deverão variar significativamente em relação ao caso de estudo teórico, ocorrendo subidas de 0,16 m, a montante da estrutura enterrada, e descidas de 0,03 m, a jusante do edifício.

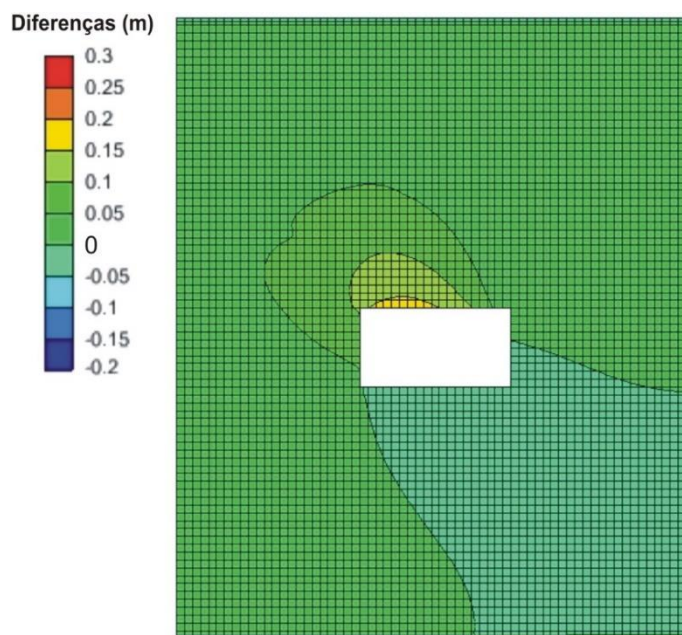


Figura V. 52. Diferença entre o potencial hidráulica obtido na fase definitiva e o obtido na fase de referência na camada 2, considerando o aumento da condição de fronteira de montante.

Conclui-se, assim, que em relação ao caso de estudo teórico, o aumento da condição de fronteira de montante contribui para o agravamento (aumento) do impacte hidrogeológico. No entanto, neste caso, dada a extensão (limitada ao edifício) e magnitude (0,16 m) do impacte, considera-se que este não é significativo.

V.3.5. Aumento da condição de fronteira de jusante

Na quinta e penúltima análise, procedeu-se ao aumento do potencial hidráulico no limite sul do modelo (condição de fronteira de jusante), para valores entre 0,9 e 1 m, ou seja, aumentou-se 0,5 m em relação ao considerado no caso de estudo. As condições de fronteira a montante e as condutividades hidráulicas (Tabela V.3) não sofreram alterações.

Com base nos resultados obtidos para a fase de referência, constantes Figuras V.53, V.54 e V.55, verifica-se que o fluxo apresenta direções semelhantes ao caso de estudo teórico, no entanto, os potenciais são mais elevados a jusante, como seria de esperar.

Em geral, os níveis de água variam entre 0,9 e 2,3 m e, na zona da construção, entre 0,93 e 0,99 m. A velocidade máxima do fluxo, atingida na zona mais permeável da areia, é cerca de $5,2 \times 10^{-8}$ m/s. No que se refere ao caudal, no modelo circulam cerca de 0,7 L/s, dos quais 0,04 L/s atravessam a zona da obra.

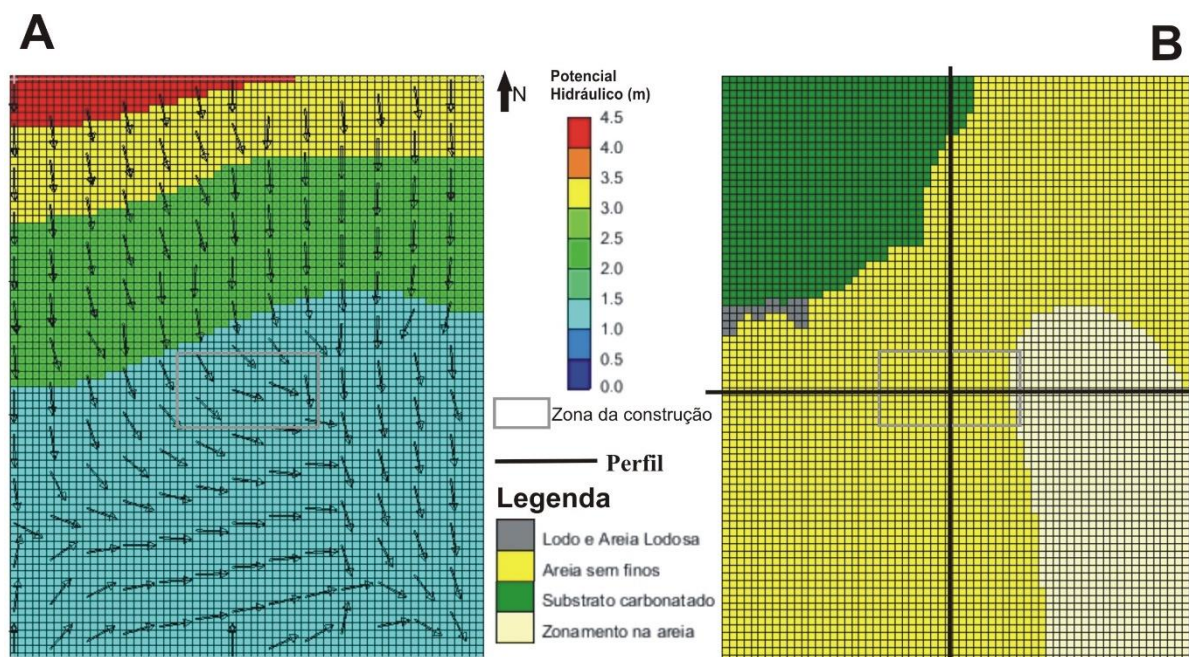


Figura V. 53. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação da fase de referência, considerando o aumento da condição de fronteira de jusante. (A) e litologia da respetiva camada (B).

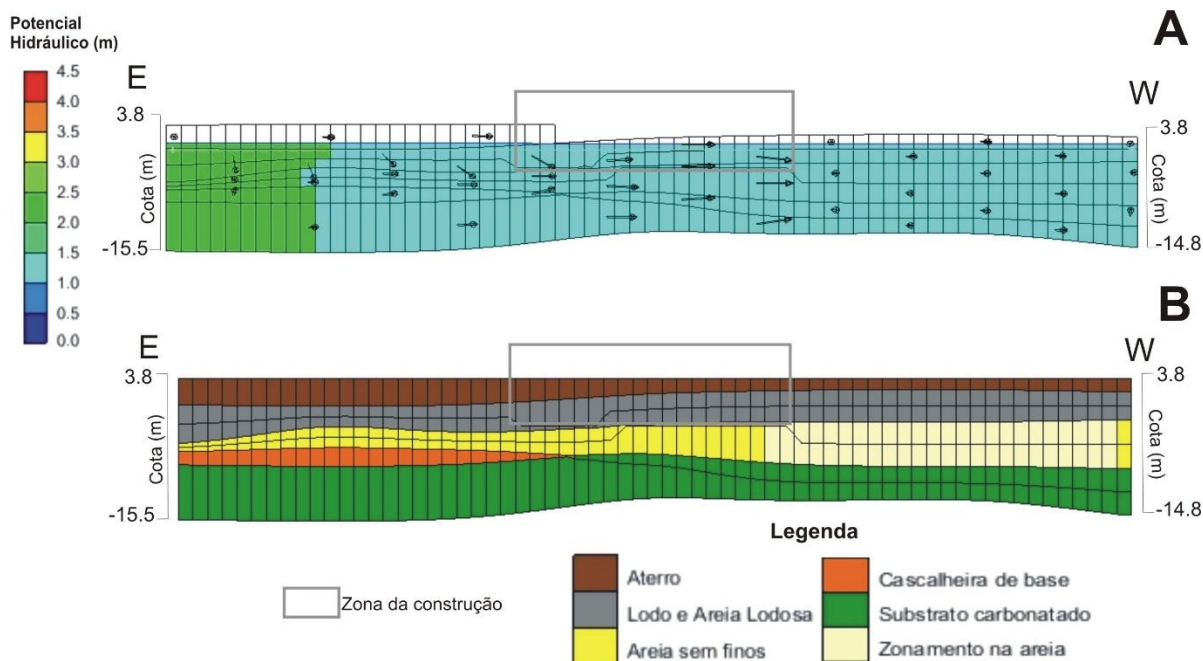


Figura V. 54. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação da fase de referência, considerando o aumento da condição de fronteira de jusante; B) Perfil litológico correspondente.

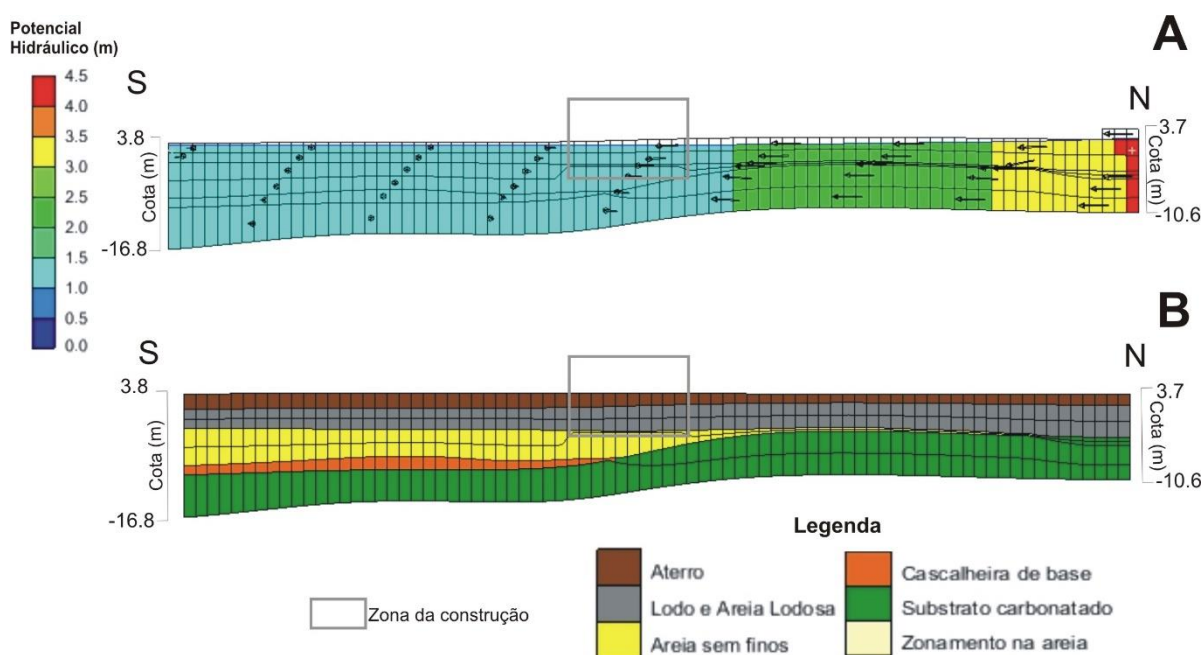


Figura V. 55. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação da fase de referência, considerando o aumento da condição de fronteira de jusante; b) Perfil litológico correspondente.

Os resultados da simulação realizada após a introdução da estrutura enterrada (fase definitiva), apresentados nas Figuras V.56, V.57 e V.58, mostram mais uma vez que as diferenças na direção do fluxo ocorrem na envolvente ao edifício, devido ao efeito barreira. Quanto à velocidade máxima do fluxo, estima-se que seja igual à obtida na fase de referência, isto é, $5,2 \times 10^{-8}$ m/s.

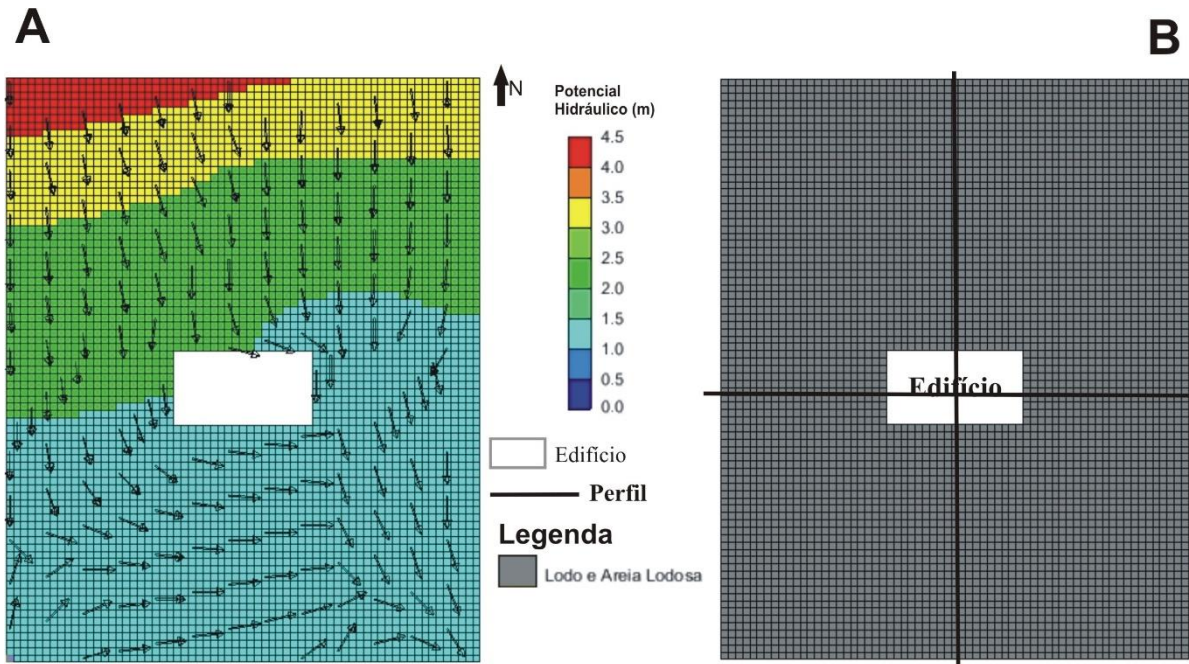


Figura V. 56. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação da fase definitiva, considerando o aumento da condição de fronteira de jusante (A) e litologia da respectiva camada (B).

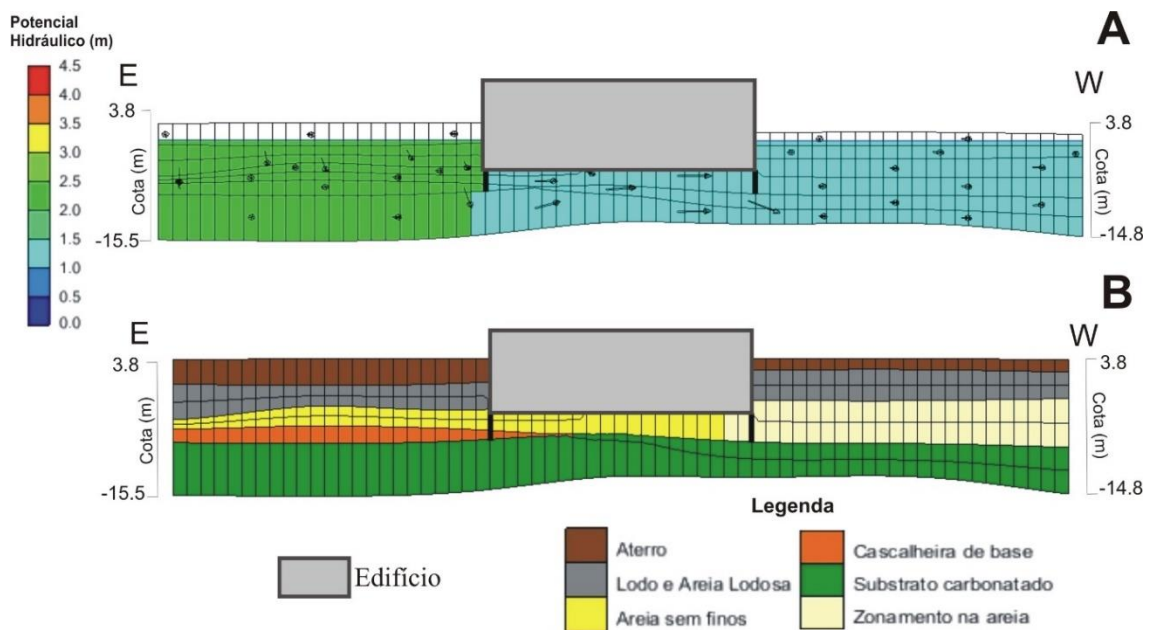


Figura V. 57. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação da fase definitiva, considerando o aumento da condição de fronteira de jusante; B) Perfil litológico correspondente.

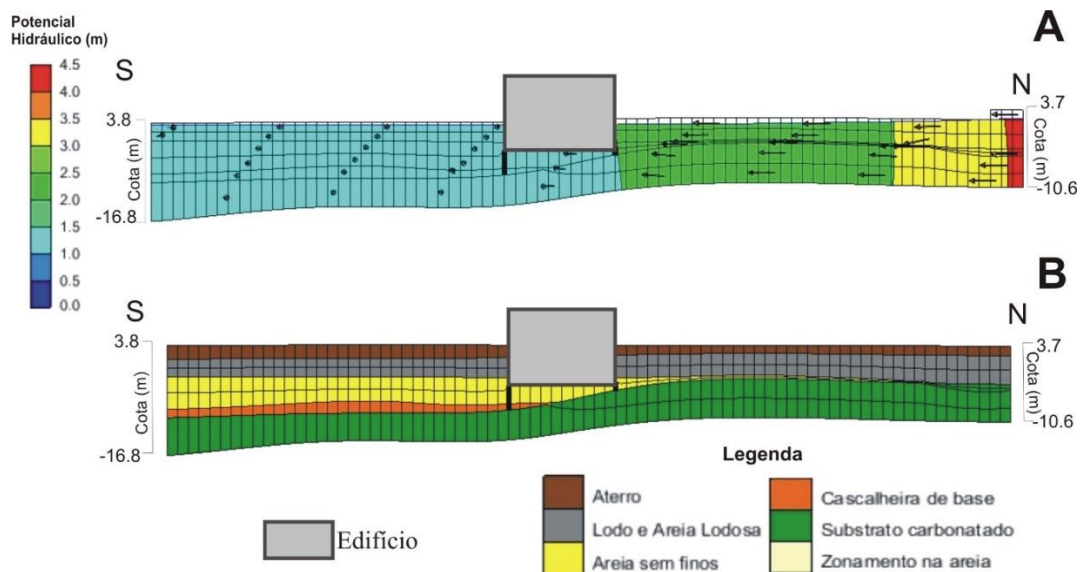


Figura V. 58. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação da fase definitiva, considerando o aumento da condição de fronteira de jusante; B) Perfil litológico correspondente.

Após a construção, o potencial hidráulico irá variar, na envolvente do edifício, entre 0,93 e 1,03 m, e o caudal, na zona de implantação do edifício, será reduzido para 0,007 L/s, ou seja, ocorrerá uma diminuição de 0,033 L/s relativamente à situação inicial. Nestas condições, a água subterrânea irá exercer uma pressão máxima na base do edifício equivalente a uma coluna de água com 3,69 m de altura.

O impacto hidrogeológico referente à construção do edifício nestas condições foi obtido através da comparação do resultado da fase definitiva com o da fase de referência, encontrando-se expresso na Figura V.59.

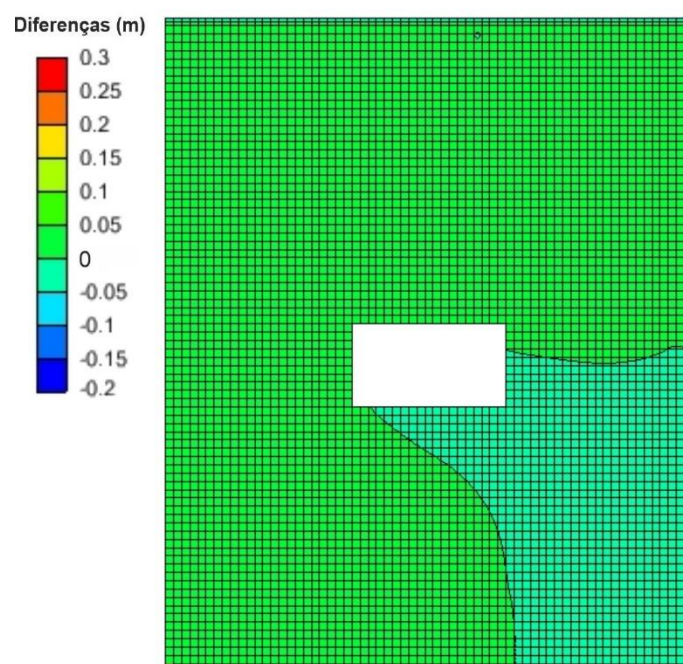


Figura V. 59. Diferenças entre o potencial hidráulico obtido na simulação da fase definitiva e o obtido na simulação da fase de referência na camada 2, considerando o aumento da condição de fronteira de jusante.

A análise da Figura V.59 permite constatar que, após a construção do edifício, os níveis de água, nestas condições, deverão variar pouco em relação ao caso de estudo teórico, observando-se subidas até 0,03 m, a montante da estrutura enterrada, e descidas de 0,01 m, a jusante do edifício.

Conclui-se, assim, que em relação ao caso de estudo teórico, o aumento da condição de fronteira de jusante (nível do rio) não contribui para agravar o impacte hidrogeológico.

V.3.6. Diminuição da condutividade hidráulica da areia e aumento da condição de fronteira de montante

Na sexta e última análise considerou-se a diminuição da condutividade hidráulica da areia aliada ao aumento da condição de fronteira de montante (limite N). No que respeita à condutividade hidráulica dos materiais, admitiram-se os valores presentes na Tabela V.11, tendo-se diminuído aproximadamente uma ordem de grandeza a condutividade hidráulica da areia sem finos, para um valor uniforme de 3×10^{-5} m/s. Relativamente ao potencial hidráulico, introduziu-se um valor constante de 4,4 m a montante (limite N) e manteve-se a condição de jusante (entre 0,4 e 0,5 m). Basicamente esta análise corresponde à junção de duas análises anteriormente descritas.

Tabela V. 11. Condutividades hidráulicas introduzidas no modelo numérico da fase de referência considerando a areia uniforme e menos permeável e condição de fronteira de montante mais elevada.

Material	K (m/s)
Aterro	2×10^{-5}
Lodo e Areia lodosa	3×10^{-7}
Areia sem finos	3×10^{-5}
Cascalheira de base	9×10^{-7}
Substrato carbonatado	3×10^{-6}

Nas Figuras V.60, V.61 e V.62 apresentam-se os resultados obtidos na simulação da fase de referência com as condições admitidas.

De acordo com a Figura V.60, o escoamento subterrâneo processa-se estritamente na direção do rio, ou seja, de N para S, uma vez que se uniformizou as propriedades da areia. Nesta situação, a velocidade máxima do fluxo é de $1,1 \times 10^{-8}$ m/s e o caudal de circulação no modelo de 0,5 L/s. Na zona do edifício, o caudal é cerca de 0,1 L/s. Quanto ao potencial hidráulico, este varia, em geral, entre 0,4 e 4,4 m e, na zona da construção, entre 1,33 e 1,98 m.

Posteriormente, simulou-se a construção do edifício nestas condições, cujos resultados se apresentam nas Figuras V.63, V.64 e V.65. A análise destas figuras sugere que, após a construção, as direções de fluxo serão muito semelhantes aos descritos para a fase de referência, ou seja, fluxo de N para S, exceto na envolvente da barreira impermeável onde a água irá circular. Estima-se que a velocidade máxima do fluxo seja igual à obtida na fase de referência, ou seja, $1,1 \times 10^{-8}$ m/s.

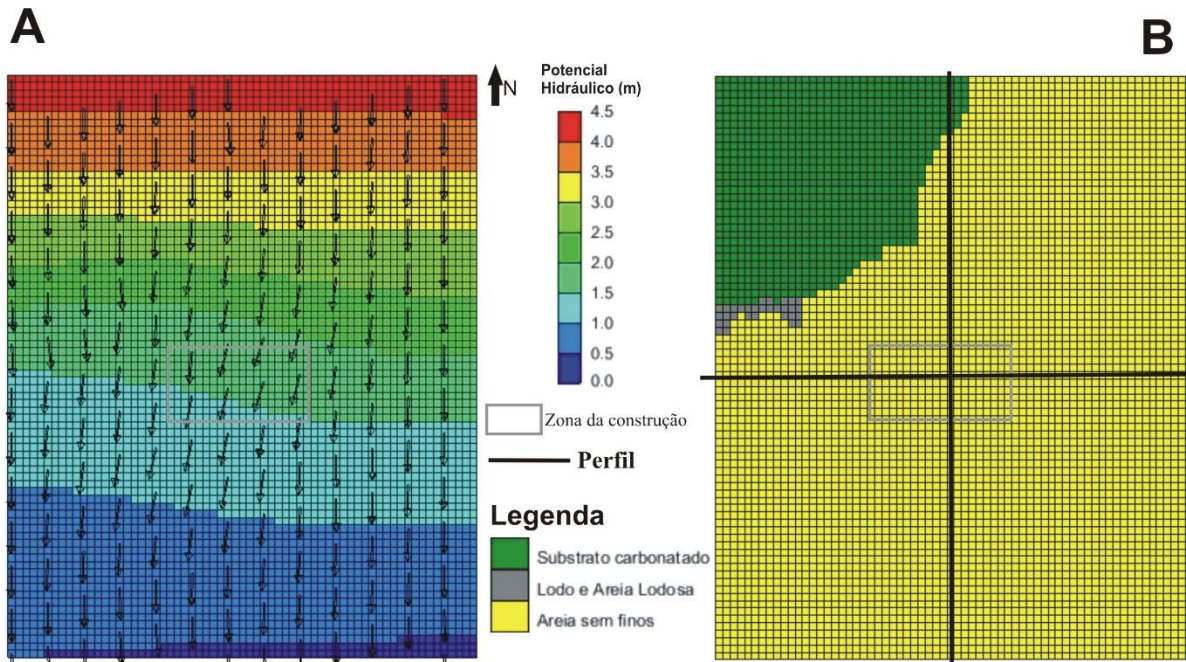


Figura V. 60. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 5, resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando a areia uniforme e menos permeável e condição de fronteira de montante mais elevada (A) e litologia da respectiva camada (B).

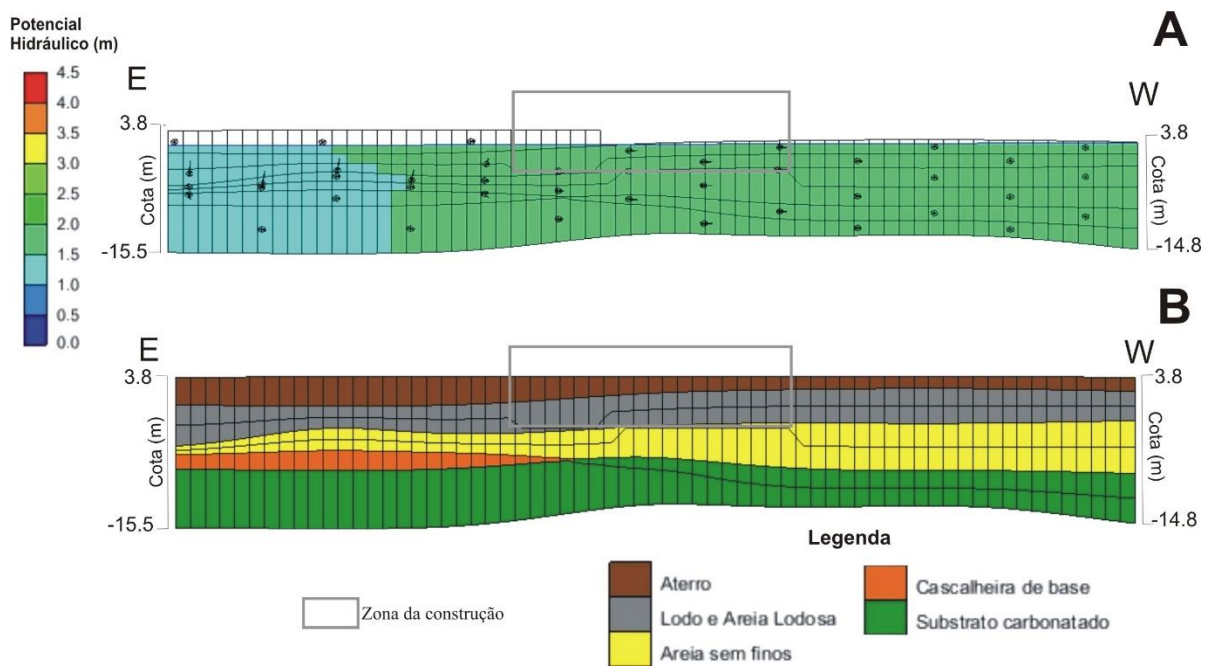


Figura V. 61. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência considerando a areia uniforme e menos permeável e condição de fronteira de montante mais elevada; B) Perfil litológico correspondente.

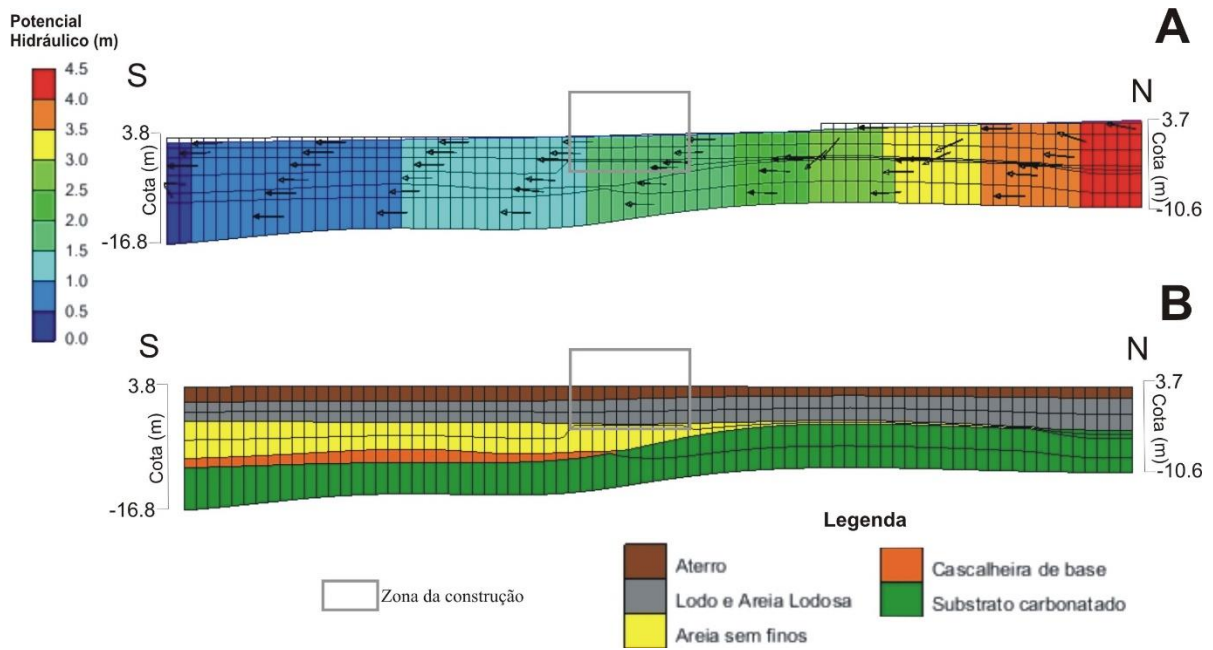


Figura V. 62. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase de referência, considerando a areia uniforme e menos permeável e condição de fronteira de montante mais elevada; B) Perfil litológico correspondente.

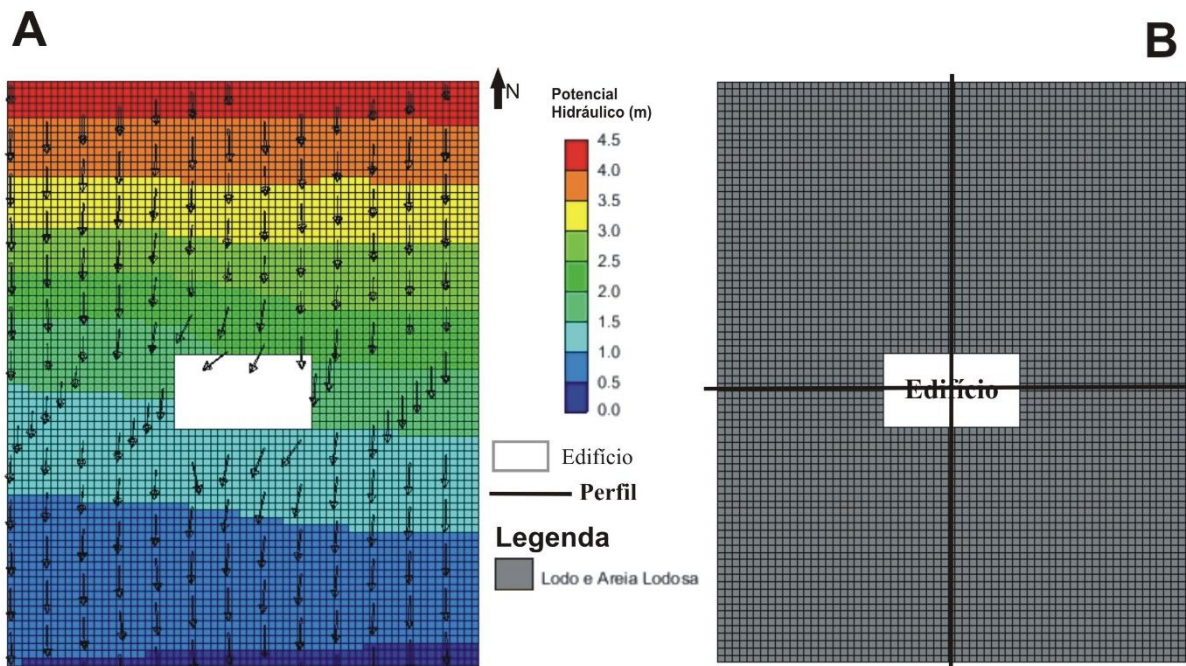


Figura V. 63. Potencial hidráulico e direção de fluxo obtidos na camada 2, resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando a areia uniforme e menos permeável e condição de fronteira de montante mais elevada (A) e litologia da respetiva camada (B).

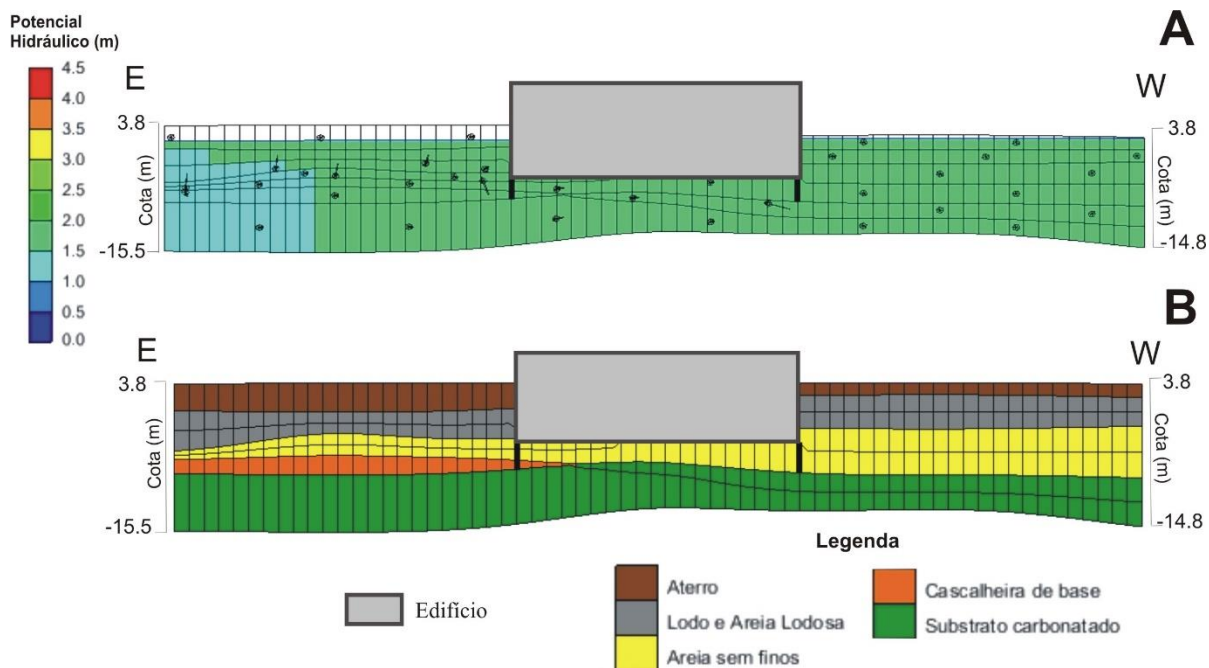


Figura V. 64. Perfil E-W. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva, considerando a areia uniforme e menos permeável e condição de fronteira de montante mais elevada; B) perfil litológico correspondente.

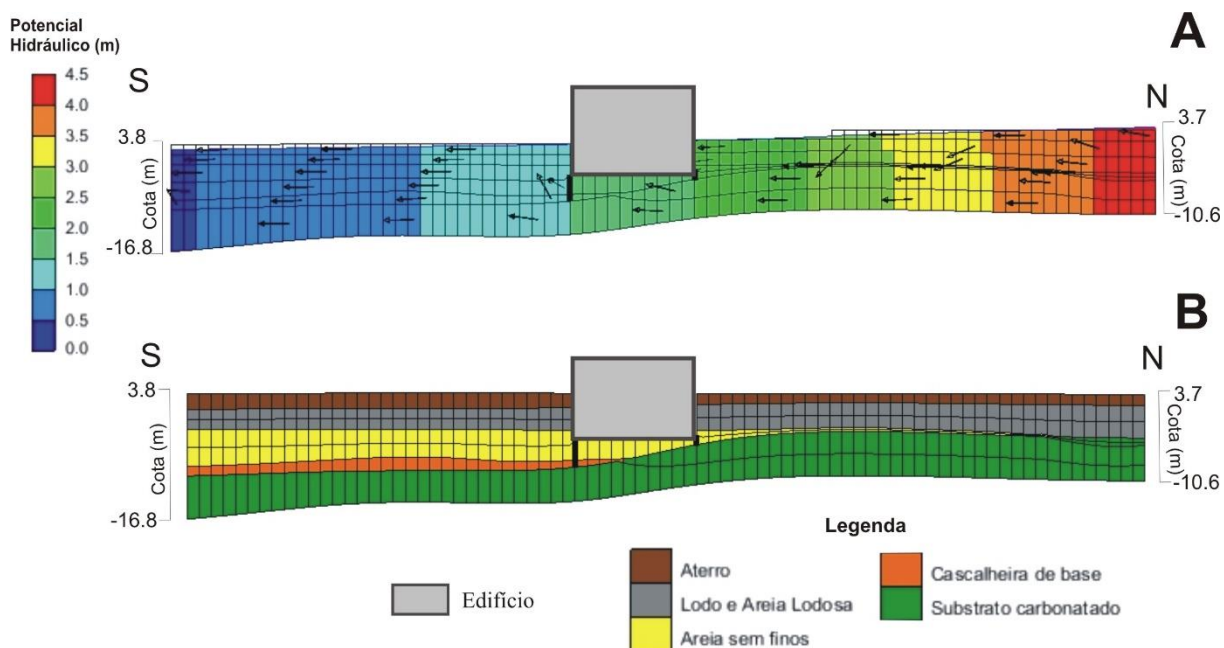


Figura V. 65. Perfil S-N. A) Potencial hidráulico e direção de fluxo resultantes da simulação numérica da fase definitiva considerando a areia uniforme e menos permeável e condição de fronteira de montante mais elevada; B) Perfil litológico correspondente.

O potencial hidráulico na envolvente do edifício deverá variar entre 1,22 e 2,16 m, enquanto o caudal na zona de implantação do edifício será reduzido para um valor de 0,08 L/s, ocorrendo apenas uma diminuição de 0,02 L/s relativamente à situação inicial. Na base do edifício, a água subterrânea irá exercer uma pressão máxima equivalente a uma coluna de água com 4,55 m de altura.

De forma a quantificar o impacto hidrogeológico provocado pela construção, comparou-se a piezometria da fase definitiva com a obtida na fase de referência. O resultado do impacto, exibido na Figura V.66, sugere que, após a construção da estrutura enterrada, os níveis de água deverão ser significativamente distintos dos da fase de referência, ocorrendo subidas até 0,26 m, a montante da estrutura enterrada, e descidas até 0,16 m, a jusante do edifício.

Conclui-se, deste modo, que a presença de areia uniforme e menos permeável aliada a um aumento da condição de fronteira de montante produz impacto hidrogeológico significativo.

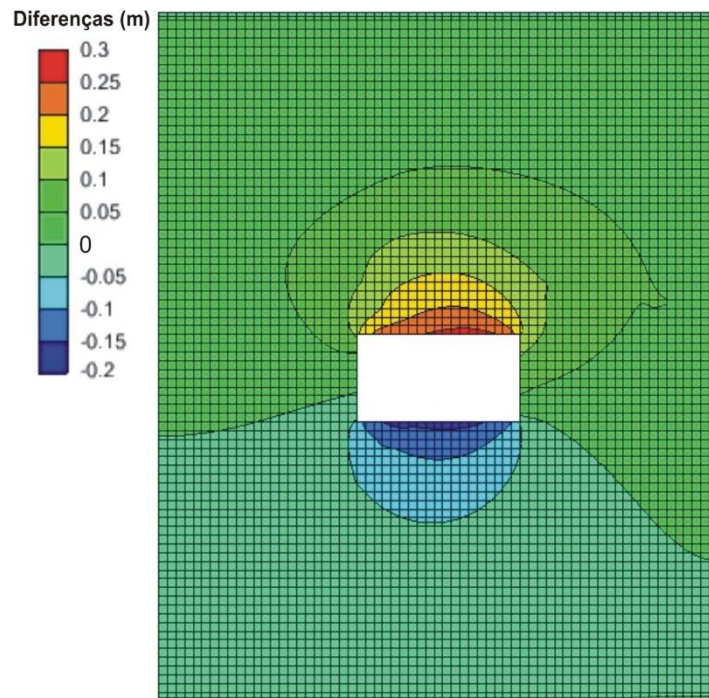


Figura V. 66. Diferença entre o potencial hidráulico obtido na fase definitiva e o obtido na fase de referência na camada 2, considerando a areia uniforme e menos permeável e condição de fronteira de montante mais elevada.

Os resultados obtidos nas diversas análises de sensibilidade são apresentados na Tabela V.12. A comparação dos resultados das análises de sensibilidade (Tabela V.12) e do caso de estudo teórico (Tabela V.6) permite concluir que, em geral, o agravamento do impacto hidrogeológico decorrente de uma construção subterrânea está relacionado com a existência de caudais de circulação elevados na zona de implantação do edifício, devido à presença de gradiente hidráulico elevado ou de materiais muito permeáveis na zona de interseção com a obra.

Tabela V. 12. Quadro-resumo das análises de sensibilidade efetuadas.

Condições analisadas	Caudal de circulação no modelo (L/s)	Caudal de circulação na zona da obra antes da construção (L/s)	Caudal de circulação na base do edifício, após construção (L/s)	Subida a montante do edifício (m)	Descida a jusante do edifício (m)
Diminuição da permeabilidade da areia	0,14	0,01	0,003	0,08	0,05
Aumento da permeabilidade da areia	15,0	4,7	0,04	0,18	0,07
Diminuição da permeabilidade do substrato	0,8	0,05	0,001	0,05	0,004
Aumento da condição de fronteira de montante	1,8	0,2	0,03	0,16	0,03
Aumento da condição de fronteira de jusante	0,7	0,04	0,007	0,03	0,01
Diminuição da permeabilidade da areia e aumento da condição de fronteira de montante	0,5	0,1	0,08	0,26	0,16

VI. Conclusão

Os modelos numéricos do fluxo subterrâneo são extremamente úteis para previsão de cenários futuros, principalmente, no que diz respeito a potenciais subidas e descidas dos níveis de água decorrentes da construção de estruturas subterrâneas. Face ao aumento deste tipo de construções em meio urbano e à crescente preocupação dos municípios em relação ao risco de inundação, considera-se extremamente importante a realização de estudos de impacto hidrogeológico mediante modelação numérica.

No presente trabalho analisou-se um caso de estudo hipotético, que compreende a construção de um edifício com uma cave e contenção periférica prolongada até ao substrato rochoso numa zona com contexto geológico e hidrogeológico muito semelhante ao encontrado em zonas aluvionares da cidade de Lisboa. O modelo numérico desenvolvido, com 7 camadas, foi calibrado de acordo com os níveis de água definidos para o caso de estudo. Durante a calibração do modelo foi necessário efetuar um zonamento na camada de areia sem finos, com uma permeabilidade mais elevada, por forma a ajustar os níveis de água e as direções de fluxo.

Posteriormente à simulação, em regime permanente, representativa das fases de referência (antes da construção) e definitiva da obra (após a construção), procedeu-se à comparação dos resultados obtidos nas duas simulações, com o intuito de determinar o impacto hidrogeológico. A análise comparativa sugere que, após a construção do edifício, as direções gerais do fluxo serão muito semelhantes às da fase de referência, ou seja, na direção do rio e da zona mais permeável da areia, no entanto, ocorrerá uma diminuição de 0,05 L/s relativamente às condições iniciais (fase de referência). Contudo, na zona do edifício, o fluxo irá contornar a estrutura subterrânea, como seria de esperar.

Após a construção da estrutura impermeável, os níveis de água deverão ser muito semelhantes aos da fase de referência, com variações pouco significativas, ocorrendo subidas máximas de 6 cm, a montante do edifício, e descidas de 1 cm, a jusante do mesmo. Conclui-se, portanto, que o impacto associado à construção do edifício, nas condições geológicas e hidrogeológicas analisadas, será reduzido.

Para além do estudo de impacto, procedeu-se também à simulação representativa da fase final de escavação, por forma a se efetuar uma análise comparativa de diferentes condições no fundo de escavação, para simular a extração de água e determinar o caudal necessário extrair da zona de escavação para manter a obra a seco. Consideraram-se três condições para representar a extração de água no fundo de escavação, nomeadamente, condição de potencial constante, condição de dreno, e por fim, condição de poço/furo de bombagem. No que diz respeito à fase de escavação, verificou-se que para se conseguir rebaixar os níveis de água, no interior na obra, abaixo do fundo de escavação com a condição de dreno e de poço de bombagem, seriam suficientes dois locais em extremos opostos da obra.

Os resultados obtidos nas diversas simulações da fase de escavação sugerem que, para realizar a obra a seco, será necessário extrair um caudal de 1,6 a 1,7 L/s. Com a condição de potencial constante no fundo de escavação obteve-se um caudal ligeiramente inferior (1,5 L/s), no entanto, o comportamento dos níveis de água não é muito realista. Com a condição de dreno ou furo de bombagem obtiveram-se resultados mais aproximados à realidade de uma obra. Porém, uma vez que as diferenças nos resultados obtidos são pouco significativas, considera-se que a fase de escavação pode ser simulada adequadamente utilizando qualquer uma das 3 condições de fronteira analisadas.

Com o intuito de avaliar os fatores que contribuem para o aumento do impacto hidrogeológico associado à obra, efetuou-se, ainda, uma análise de sensibilidade relativamente aos parâmetros hidráulicos e às condições de fronteira consideradas no caso de estudo, tendo-se constatado o seguinte:

- a diminuição da condutividade hidráulica e a uniformização da areia sem finos produz um aumento pouco significativo do impacto hidrogeológico;
- o aumento da condutividade hidráulica e uniformização da areia sem finos potencia um aumento significativo do impacto;
- a diminuição da condutividade hidráulica do substrato rochoso não promove impacto hidrogeológico;
- o aumento da condição de fronteira de montante contribui para agravar (aumentar) o impacto;
- o aumento da condição de fronteira de jusante (nível do rio) não contribui para agravar o impacto hidrogeológico;
- a presença de areia uniforme e menos permeável aliada a um aumento da condição de fronteira de montante produz impacto significativo.

Os resultados obtidos nas diversas análises de sensibilidade permitem concluir que, em geral, o principal fator que contribui para o agravamento do impacto hidrogeológico decorrente de uma construção subterrânea é o caudal de circulação existente na zona de interseção da estrutura subterrânea, quer associado a um gradiente hidráulico elevado, quer à presença de materiais de permeabilidade elevada.

Para além das análises realizadas, seria, igualmente, interessante efetuar simulações com outras condições de fronteira nos limites do modelo, como por exemplo, fronteira de caudal especificado, em vez de potencial especificado. Em vez de regime permanente, também seria interessante analisar o impacto considerando regime transitório, incluindo, neste caso o fator tempo, e analisando, por exemplo, o efeito das marés.

Salienta-se que a modelação numérica corresponde a uma representação da realidade e, portanto, é importante que os resultados dos modelos de previsão do impacto hidrogeológico sejam validados, com dados de observação (piezómetros) adquiridos durante e após a construção de uma obra subterrânea.

Referências Bibliográficas

- Anderson, M.P., Woessner, W.W. e Hunt, R.J., 2015. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press, 2nd Edition, 564 p.
- Bayer, P., Duran, E., Baumann, R. e Finkel, M., 2009. Optimized groundwater drawdown in a subsiding urban mining area. *Journal of Hydrology*, 365, 95-104.
- Bonomi, T. e Bellini, R., 2003. The tunnel impact on the underground level in an urban area: a modelling approach to forecast it. *Materials and Geoenvironment*, 50, 45-48.
- Bundschuh, J. & Suárez Arriaga, M.C., 2010: Introduction to the numerical modeling of groundwater and geothermal systems: Fundamentals of mass, energy and solute transport in poroelastic rocks. CRC Press, Boca Raton, FL, 522 p.
- Custodio, E. e Carrera, J., 1989. Aspectos generales sobre la contaminación de las aguas subterráneas. *OP*, 13, 96-112.
- Font-Capó, J., Vázquez-Suñe, E., Carrera, J., Martí, D., Carbonell, R. e Pérez-Estaun, A., 2011. Groundwater inflow prediction in urban tunneling with a tunnel boring machine (TBM). *Engineering Geology*, 121, 46-54.
- Kresic, N., 2006. Hydrogeology and groundwater Modeling. CRC Press, 2nd Edition, Boca Raton, F, 807 p.
- Kusomoto, S., Omae, H., Sato, T., Watanabe, M., Kobayashi, N. e Nishida, K., 2003. Construction of preservation facilities on natural groundwater flows. In: Kono, Nishigaki, Komatsu (Eds.), *Groundwater Engineering – Recent Advances*. Swets and Zeitlinger, Lisse, 237-242.
- Liang, Z., Ren, T. e Ningbo, W., 2017. Groundwater impact of open cut coal mine and an assessment methodology: A case study in NSW. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27, 861-866.
- Marinos, P. e Kavvas, M., 1997. Rise of the groundwater table when the flow is obstructed by shallow tunnels. In: Chilton, J. (Ed.), *Groundwater in the Urban Environment: Problems, Processes and Management*. Balkema, Rotterdam, 49-54.
- Mcdonald, M.G. e Harbaugh, A.W., 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Livro 6, Capítulo A1, 586 p.
- Merrick, N. e Jewell, M., 2003. Modelling of the groundwater impact of a sunken urban motorway in Sidney, Australia. *Materials and Geoenvironment*, 50, 229-232.
- Oude Essink, G.H.P., 2001. Groundwater Modeling, Utrecht University, Interfaculty Centre of Hydrology Utrecht, Institute of Earth Sciences, Department of Geophysics, 193 p.

- Paris, A., Teatini, P., Venturini, S., Gambolati, G. e Brnstein, A.G., 2010. Hydrological effects of bounding the Venice (Italy) industrial harbour by a protection cut-off wall: a modeling study. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15 (11), 882-891.
- Pujades, E., López, A., Carrera, J., Vázquez-Suñé, Jurado, A., 2012. Barrier effect of underground structures on aquifers. *Engineering Geology*, volumes 145-146, 41-49.
- Pujades, E., Vázquez-Suñe, E., Culí, L., Carrera, J., Ledesma, A. e Jurado, A., 2015. Hydrogeological impact assessment by tunnelling at sites of high sensitivity. *Engineering Geology*, 193, 421-434.
- Rapantova, N., Arnost, G., Vojtek, D., Halir, J. e Michalek, B., 2007. Ground water flow modeling applications in mining hydrogeology, *Mine Water Environ*, 26, 264-270.
- Ricci, G., Enrione, R. e Eusebio, A., 2007. Numerical modelling of the interference between underground structures and aquifers in urban environment. The Turin subway – line 1. *In: Barták, Hrdine, Romancov, Zlámál (Eds.), Underground Space*. Taylor and Francis Group, London, 1323-1329.
- Surinaidu, L., Gurunadha Rao, V.V.S. e Srinivasa Rao, N., 2014. Hydrogeological and groundwater modeling studies to estimate the groundwater inflows into the coal mines at different mine development stages using MODFLOW, Andhra Pradesh, India. *Water Resources and Industry*, 7-8, 49-65.
- Tambara, M., Nishigaki, M., Hashimoto, T., Shinshi, Y. e Daito, K., 2003. Basic concept on preservation natural groundwater flows from intercepting by underground structure. *In: Kono, Nishigaki, Komatsu (Eds.), Groundwater Engineering – Recent Advances*. Swets and Zeitlinger, Lisse, 217-222.
- Vázquez-Suñe. E., Sánchez-Vila, X., Carrera, J., 2004. Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain. *Hydrogeology Journal*, 13, 522-533.
- Wang, H.F. e Anderson, M.P., 1995. *Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods*. San Diego, California, USA: Academic Press, 237 p.
- Weisstein, E., 2003. *CRC Concise Encyclopedia of Mathematics*, CRC Press, Second Edition, 3242 p.
- Yang, F.R., Lee, C.H., Kung, W.J. e Yeh, H.F., 2009. The impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of “Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project” in Taiwan. *Engineering Geology*, 103, 39-58
- Zarei, H.R., Uromeihy, A. E Sharifzadeh, M., 2011. Evaluation of high local groundwater inflow to a rock tunnel by characterization of geological features. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26, 364-373.